

# Efectos del manejo post-incendio en las propiedades del suelo: un caso de estudio en el Parque Natural del Montgó



Facultad de Ciencias Experimentales

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

**Antonio Palma Bernal**

**Grado en Ciencias Ambientales**

**2017-2018**

**Tutores:** Jorge Mataix Solera y Victoria Arcenegui Baldó

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer el constante apoyo y ánimo además de los conocimientos que me han inculcado por parte de mis tutores Jorge y Vicky, los cuales siempre han estado atentos y listos para poder guiarme y ayudarme en este trayecto para finalizar unos años maravillosos en la universidad.

Quiero mencionar que este largo viaje no podría haberlo acabado sin el apoyo incondicional de la que considero ya una amiga más, Vicky gracias por esos días de charlas, de trabajo duro y de alegrías en el laboratorio y por enseñarme todo lo que has podido y darme alas para no dejar de aprender.

Todo este trabajo no podría existir sin el apoyo constante y diario tanto de toda mi familia como de los seres queridos a los que adoro, que están siempre encima de mí para que todo salga bien.

Asimismo por último agradecer la financiación de los proyectos “POSTFIRE” (CGL2013- 47862-C2-1-R), y “POSTFIRE\_CARE” (CGL2016-75178-C2-1-R) financiados por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), al Parque Natural del Montgó y a Botánica Mediterránea S.L por su colaboración.

Muchas gracias a todos por hacer de esto toda una realidad.

## LISTADO DE FIGURAS Y TABLA

### Figuras.

- **Figura 1.** Evolución de la superficie total afectada y la superficie afectada por GIF en España en el periodo 2005-2014. ([http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios\\_default.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx)).
- **Figura 2.** Fotografía del estado de la zona de estudio tomada en el 4º muestreo. Foto: A. Palma-Bernal, 2017.
- **Figura 3.** Localización y georeferenciación del área de estudio (gvSIG).
- **Figura 4.** Diagrama ombrotérmico Jávea, 1996-2009 (<http://webs.ucm.es/info/cif/plot/es-javea.htm>).
- **Figura 5.** Mapa Geológico del Parque Natural del Montgó (Fuente: IGME <http://info.igme.es/visorweb/>).
- **Figura 6.** Zona de muestreo con topografía abancalada (bancales de piedra).
- **Figura 7.** Esquema de la localización de las parcelas (Cabo de San Antonio). En verde las control, en rojo las de saca de madera y en azul las de mulch.
- **Figura 8.** Toma de muestras (muestreo 4) en una de las parcelas asignadas al estudio. Foto: A. Palma-Bernal, 2017.
- **Figura 9.** Evolución temporal del contenido total de agregados (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).
- **Figura 10.** Evolución temporal de los agregados estables (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).
- **Figura 11.** Evolución temporal de la capacidad de campo (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).
- **Figura 12.** Evolución temporal de la materia orgánica (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

- **Figura 13. Evolución temporal de nitrógeno (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**
- **Figura 14. Evolución temporal de fósforo asimilable (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**
- **Figura 15. Evolución temporal del pH del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**
- **Figura 16. Evolución temporal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**
- **Figura 17. Evolución temporal del carbono de la biomasa ( $\text{mg C} / \text{Kg}$ ) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**
- **Figura 18. Evolución temporal de la respiración edáfica basal ( $\text{C-CO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{h}/\text{g}$ )) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**

#### **Tablas.**

- **Tabla 1. Tipos de manejos post-incendio utilizados en este estudio: control (C), saca (s) y mulch (M).**
- **Tabla 2. Comparativa estadística entre los tratamientos para cada uno de los parámetros estudiados, comparando el manejo control (C) con la saca (S) y el mulch (M). Significancia: \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ ; \*\*\* $p < 0,001$  y ns: no significativo ( $p > 0,05$ ).**

## **Abreviaturas**

M1: primer muestreo

M2: segundo muestreo

M3: tercer muestreo

M4: cuarto muestreo

MO: Materia Orgánica.

CE: Conductividad eléctrica.

EA: Estabilidad de agregados.

CTA: Contenido total agregados.

P: Fósforo asimilable.

CMB: Carbono de la Biomasa Microbiana.

REB: Respiración Edáfica Basal.

GIF: Gran incendio forestal

C: Control

S: Saca

M: Mulch

N: Nitrógeno.



## Resumen

En ambientes mediterráneos el manejo post-incendio es clave para controlar el impacto del fuego en las propiedades del suelo y la recuperación de la cubierta vegetal. Actividades habituales como la extracción de madera quemada pueden provocar una degradación del suelo, pero este efecto no será el mismo dependiendo de cómo, cuándo y sobre qué tipo de suelo se realice, es por tanto necesario tener más estudios del impacto de este manejo en diferentes condiciones. Por otro lado hay estudios que apuntan a que la aplicación de acolchados sobre el suelo son efectivas en la protección del suelo y reducción de tasas de erosión, pero hay pocos estudios sobre el efecto en las propiedades del suelo. En este estudio comparamos estos tratamientos frente a controles (quemados sin actuación) en las propiedades de un suelo Mediterráneo afectado por un incendio forestal. Los resultados muestran que a corto plazo la extracción de madera quemada tuvo un impacto negativo en el contenido de materia orgánica del suelo y en la actividad microbiana. El tratamiento con mulch supuso a medio plazo una mejora en el contenido de nitrógeno y en la capacidad de retención hídrica del suelo.

Palabras clave: incendio, manejo post-incendio, propiedades del suelo, extracción de madera, mulch.

## Abstract

In Mediterranean environments, post-fire management is key to controlling the impact of fire on soil properties and the recovery of vegetation cover. Common activities such as the extraction of burned wood (salvage logging) can provoke soil degradation, but this effect will not be the same depending on how, when and on what type of soil is applied, it is therefore necessary to have more studies of the impact of this management in different conditions. On the other hand there are studies that suggest that the application of mulch on the soil is effective in protecting the soil and reducing soil erosion rates, but there are few studies on the effect on soil properties. In this study, we compared these treatments against controls (burned without action) in the properties of a Mediterranean soil affected by a forest fire. The results show that in the short term the salvage logging had a negative impact on soil organic matter content and microbial activity. An improvement in the nitrogen content and in the soil water holding capacity of the soil was observed in the medium term.

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

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
1.1. Tratamientos post-incendio y sus efectos en las propiedades del suelo.....	8
<b>2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b> .....	10
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	13
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	13
3.1.1. Localización.....	13
3.1.2. Clima.....	14
3.1.3. Geología y geomorfología.....	15
3.1.4. Edafología.....	16
3.2. Diseño experimental.....	17
3.2.1. Toma de muestras.....	17
3.3. Análisis de laboratorio.....	19
3.4. Análisis estadísticos.....	20
<b>4. RESULTADOS</b> .....	21
4.1. Propiedades medidas.....	22
4.1.1. Contenido total de agregados.....	22
4.1.2. Estabilidad de agregados.....	23
4.1.3. Capacidad de campo.....	24
4.1.4. Materia orgánica.....	25
4.1.5. Nitrógeno.....	26
4.1.6. Fósforo asimilable.....	27
4.1.7. pH.....	28
4.1.8. Conductividad eléctrica.....	29
4.1.9. Carbono de la biomasa microbiana.....	30
4.1.10. Respiración edáfica basal.....	31
<b>5. DISCUSIÓN</b> .....	32
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	34
<b>7. PROYECCIÓN FUTURA</b> .....	35
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	36

## 1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los factores modeladores de los paisajes en ecosistemas Mediterráneos son los grandes incendios forestales (GIF). Los ecosistemas mediterráneos han experimentado grandes cambios a lo largo de miles de años, ocasionando una modificación del suelo para su aprovechamiento y beneficio (McNeil, 1992). Es sabido que los ecosistemas mediterráneos se ven altamente influenciados por los incendios, de tal manera que se considera como una de las principales causas de cambio en los ecosistemas y en las propiedades del suelo (Andreu et al., 1994). El efecto de los incendios sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ha sido estudiado por muchos autores (Certini, 2005). Dependiendo de la intensidad del fuego los efectos que puede acarrear serán directos o indirectos.

Los incendios pueden aumentar la escorrentía y la erosión del suelo principalmente durante los primeros días y meses después del incendio, cuando la vegetación del suelo está aún rebrotando o creciendo y por tanto este se encuentra desnudo. En el Mediterráneo, se da la característica por condiciones climáticas que propician el fuego que la mayoría de los incendios ocurren en verano, en la época más seca, previa a los meses con más riesgo de lluvias torrenciales que suelen darse en septiembre y octubre. Debido a la suma de estos factores y con la pérdida de la cobertura vegetal se sabe que un incendio puede tener consecuencias muy graves de pérdida de suelos y degradación del mismo (Cerdà, 1998). Todo esto hace que sea de vital importancia aplicar tratamientos de emergencia post-incendio para estabilizar y reducir las pérdidas de suelo, y facilitar la recuperación de la cubierta vegetal, y al mismo tiempo evitar manejos inadecuados que promuevan la degradación del suelo.

Durante los últimos años, las causas de incendios han sido principalmente originadas por algún factor humano, incluso más del 70% ocurre con una frecuencia e intensidad mucho mayor que el fuego natural (Mataix-Solera y Guerrero, 2008). Por tanto, el estudio de la incidencia del fuego en nuestros ecosistemas y en especial en los suelos, ya que la aceleración de los ciclos biogeoquímicos se inician en él, va a ser decisivo para entender la evolución post-incendio, y la recuperación del ecosistema (Mataix-Solera y Cerdà, 2009), de hecho, las propuestas de tratamientos en la gestión pre- y post-incendio adquieren un alto grado de interés y utilidad.

## 1.1 Tratamientos post-incendio y sus efectos en las propiedades del suelo.

Evaluar el uso de diferentes técnicas post-incendio se hace crucial para conocer el impacto sobre el suelo, y comprender cuál es el mejor tratamiento después del fuego. Entre las técnicas más utilizadas, se suele utilizar el mulch o acolchamiento de la zona, se suele emplear la astilla de las propias ramas caídas aunque también se usan otros materiales como puede ser la paja (Fernández et al., 2011; Robichaud, 2009). Se han encontrado casos donde el uso del mulch ha reducido la erosión frente al mismo suelo quemado sin un tratamiento a modo de control después del incendio (Bautista et al., 1996).

En otros estudios (Fernández et al., 2011) se comprobó que el mulch de paja aplicado a una tasa de 2 Mg/ha consiguió cubrir el 80% del suelo mientras que la aplicación de 4 Mg/ha de mulch de astilla sólo proporcionó una cobertura del 45%. Estos resultados muestran que el acolchado de paja suele ser más eficaz por cantidad y capaz de reducir las pérdidas ocasionadas por la erosión hasta en un 66% frente a un suelo control que no ha recibido acolchado durante un año transcurrido tras el incendio, sin embargo la paja es más fácilmente erosionable por el viento.

Otra actuación frecuentemente usada en zonas quemadas es la saca de madera, la cual dependiendo de cómo se realice, cuándo, y otros factores como el tipo de suelo puede tener consecuencias más negativas que el propio incendio (García-Orenes et al., 2017). Se ha comprobado que el efecto de la extracción de madera quemada utilizando maquinaria pesada y arrastre de troncos sobre la superficie del suelo en una zona forestal quemada 2 años después de la saca tuvo consecuencias muy negativas para el sistema suelo-planta (García-Orenes et al., 2017; Pereg et al., 2018).

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). El hecho del uso de maquinaria pesada acarrea una compactación del suelo lo que provoca una disminución en la velocidad de infiltración del suelo (Wagenbrenner et al., 2016).

Siguen siendo necesarios sin embargo más estudios sobre estos manejos frente a una recuperación natural. Este tema es de máximo interés, más aún cuando sabemos que en muchos casos la expectativa de la recuperación natural es buena y la recomendación principal a veces es no actuar.

Es conocido que la política forestal más tradicional en la cuenca mediterránea ha ido hacia la reforestación, durante muchos años, utilizando principalmente una única especie como es el pino después de los incendios, siendo estos bosques en pocas décadas de nuevo un peligro por posibles nuevos incendios (Pausas et al., 2004). También se ha intentado replantar otras especies del género *Quercus sp*, pero el problema es que en este caso la plantación es mediante semillas pero estas no suelen sobrevivir. Es remarcable decir que dicho tipo de plantación requiere métodos que pueden acabar alterando el suelo y la vegetación como es el uso de la maquinaria pesada.

Es importante por tanto conseguir mediante el estudio una estrecha colaboración entre investigación y gestión de la zona afectada por estos grandes incendios forestales dado que así el trabajo será más eficiente en cuanto a las medidas de restauración post-incendio. Además estos estudios permiten monitorizar el impacto de las medidas habituales que se realizan en zonas quemadas y que han sido muy poco estudiadas (Mataix-Solera et al., 2016).

Por lo tanto la última decisión de en qué momento, dónde y qué tipo de tratamientos post-incendio usar requiere una evaluación del efecto del incendio, del clima de la zona, los suelos afectados y la topografía e hidrología de la cuenca (Robichaud, 2009).

## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

Durante 2014, año del incendio que es objeto de nuestro estudio se produjeron en España 7 GIF, número significativamente inferior al valor medio del decenio 2005-2014 (26 GIF) y muy por debajo de los máximos registrados en 2005 y 2006 (48 y 58 GIF respectivamente, Figura 1).

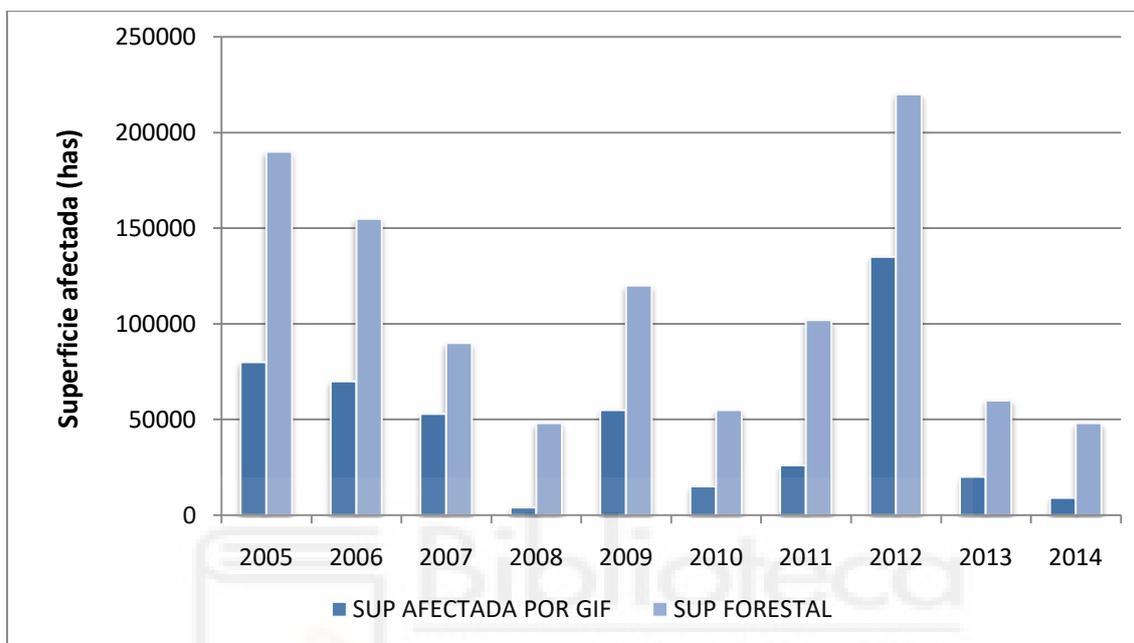


Figura 1. Evolución de la superficie total afectada y la superficie afectada por GIF en España en el periodo 2005-2014. ([http://www.mapama.gob.es/es/ desarrollo-rural/estadisticas/incendios\\_default.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/ desarrollo-rural/estadisticas/incendios_default.aspx)).

El 11 de septiembre de 2014 tuvo lugar un incendio forestal que afectó a 403,85 has en el Parque Natural del Montgó (Jávea – Dénia, Provincia de Alicante), la causa del incendio es todavía desconocida. El incendio no llega a las 500 has pero casi y teniendo en cuenta la superficie del Parque Natural, debemos considerarlo como un incendio relevante. La zona de efecto del incendio de las cuales 318 has son forestales está comprendida entre dos localidades, un total de 136 de dichas has pertenecen al término de Dénia y 268 has al de Jávea. Se precisó que el 79% de la superficie afectada en el incendio era arbolado y el resto matorral y monte bajo con alta capacidad de regeneración.

La evolución de la cobertura vegetal ha sido buena y podemos ver la existencia de un gran número de ejemplares de *Pinus halepensis* junto con *Pistacia lentiscus*, *Ulex parviflorus* o *Chamaerops humilis* en la zona que han crecido de forma natural. Es importante destacar que el suelo concreto de la zona de estudio es un Xerorthent lítico (Soil Survey Staff, 2014) desarrollado sobre calizas margosas.



**Figura 2. Fotografía del estado de la zona de estudio tomada en el 4º muestreo. Foto: A. Palma-Bernal, 2017.**

La duración del estudio es de un total de 3 años en la que se han llevado a cabo varios muestreos y análisis de la zona para conocer la evolución de las propiedades del suelo tras los tratamientos post-incendio llevados a cabo. Este TFG corresponde al último muestreo en el que tras realizar los análisis comparamos con los resultados de los 3 muestreos anteriores.

El calendario de los muestreos de suelos que se han realizado en esta zona es el siguiente:

- ❖ 04/12/2014. Muestreo 1 (M1)
- ❖ 13/05/2015. Muestreo 2 (M2)
- ❖ 04/12/2015. Muestreo 3 (M3)
- ❖ 03/11/2017. Muestreo 4 (estudio actual M4)

Con este estudio se pretende evaluar cómo afectan los diferentes manejos post-incendio sobre un mismo suelo forestal, para determinar su afección a corto y medio plazo.

Se pretende por tanto:

1. Estudiar la variación en las propiedades físico-químicas como son: estabilidad de agregados, capacidad de campo, contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo disponible, pH, conductividad eléctrica, para apreciar si existían diferencias entre los manejos post-incendios empleados.
2. Conocer la respuesta microbiana del suelo, midiendo la biomasa microbiana y la respiración edáfica basal, para los tres tipos de manejo estudiados.
3. Contrastar los manejos post-incendio propuestos para mejorar la calidad del suelo tras un incendio.
4. Establecer para este caso concreto qué medida post-incendio es la más indicada para contribuir a asesorar en futuros casos.





### 3.1.2. Clima.

Los datos climáticos de la estación más cercana localizada en Jávea, nos muestra que dicha zona presenta un clima típico Mediterráneo. Aunque el Parque Natural del Montgó se encuentra en la divisoria de dos variantes de clima, un sector de llanura litoral lluviosa donde las precipitaciones alcanzan un pico máximo otoñal, y un periodo de acusada sequía estival con media anual entre 500-600 mm y otro sector hacia el sur que pasa a ser un clima semiárido. Se trata por lo tanto de una zona de transición climática. En cuanto a la temperatura la zona de Jávea se distingue por sus inviernos suaves siendo enero el mes más frío con 11,2 °C, y meses de verano más calurosos siendo julio y agosto los meses más calurosos con medias de 30,2 °C. La media de temperatura anual de la zona es de 17,4 °C (Figura 4).

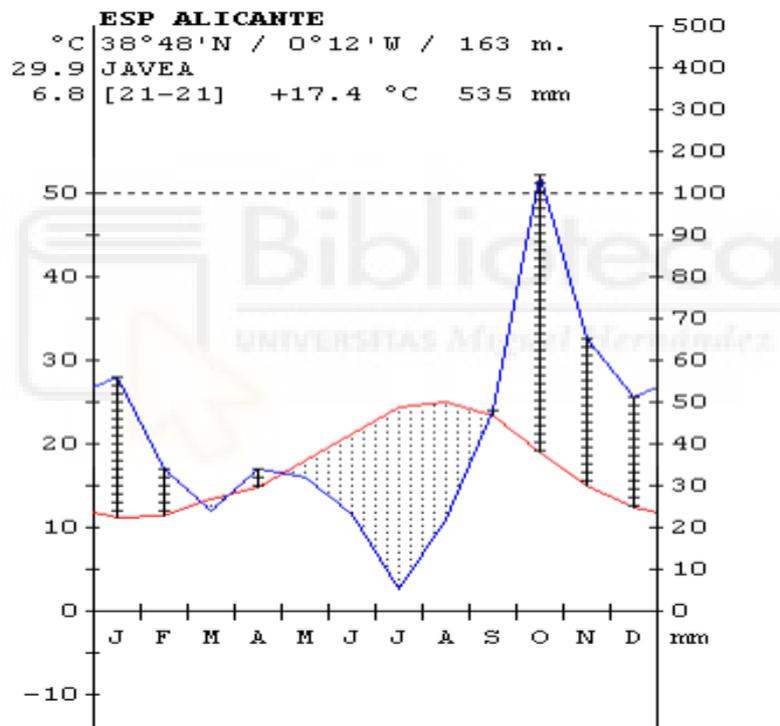
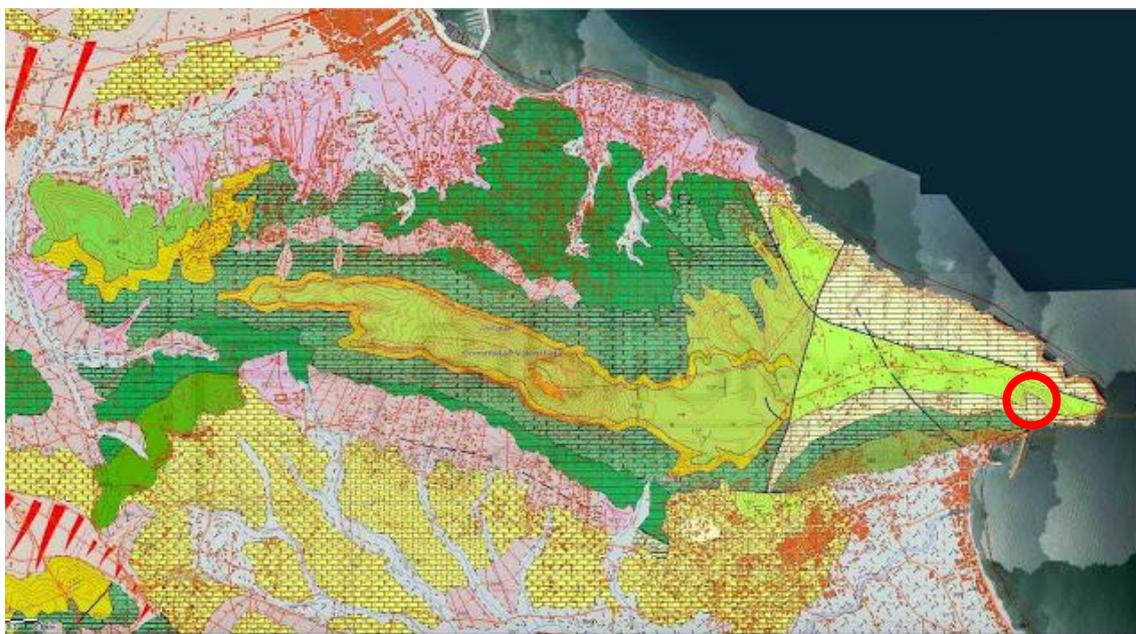


Figura 4. Diagrama ombrotérmico Jávea, 1996-2009 (<http://webs.ucm.es/info/cif/plot/es-javea.htm>).

### 3.1.3. Geología y geomorfología.

En el mapa geológico del Parque Natural del Montgó (Figura 5) se puede observar como toda la elevación montañosa está formada principalmente por terrenos predominantemente calcáreos (colores verdes oscuros y claros) de edad cretácica, rodeados por materiales terciarios principalmente margosos (colores amarillos) que se localizan en las zonas menos elevadas, principalmente valles fluviales. Entre ambos tipos de terrenos se sitúan depósitos cuaternarios en forma de orlas o abanicos aluviales que se adosan a los relieves cretácicos (colores grises) o constituyen el relleno de los valles de los principales ríos.



**Figura 5. Mapa Geológico del Parque Natural del Montgó (Fuente: IGME <http://info.igme.es/visorweb/>).**

La continuación hacia el Este de la Sierra es el Cabo de San Antonio que presenta una longitud de 3.500 metros y un relieve sensiblemente plano con una cota media de 160 m s.n.m. (Planas de Justa y San Jeromi).

Geomorfológicamente la Sierra del Montgó es muy compleja. El elemento geomorfológico predominante, y el más llamativo, son los grandes acantilados tanto los que se sitúan a ambos lados del Cabo de San Antonio como los que bordean ambos lados de la propia Sierra.

#### 3.1.4. Edafología.

En el Montgó existen básicamente dos tipos de litologías, calizas y calizas margosas. Uno de los suelos predominantes en el Parque es la denominada *Terra rossa*, uno de los más antiguos presente en el Mediterráneo, formado por la meteorización intensa de rocas calizas (procesos kársticos de disolución), son suelos algo más arcillosos, rojos por la presencia de hematites, descarbonatados y que se clasifican principalmente como Rhodoxeralfs líticos en la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) o Luvisoles crómicos (WRB, 2014).

La *Terra rossa* presenta una particularidad muy interesante que favorece la regeneración de la flora tras los incendios, y es que son suelos muy poco susceptibles de desarrollar hidrofobicidad o repelencia al agua como consecuencia de la combustión de la hojarasca y la materia orgánica del suelo (Mataix-Solera et al., 2008). Esto es debido principalmente a una mayor presencia de caolinita en la fracción arcilla y por tanto absorbe muy bien el agua, incluso después de un incendio. Esto facilita la germinación de las semillas tras un fuego, el rebrote rápido, y también contribuye a que el terreno se erosione menos. La zona concreta de nuestro estudio situado en el barranco que baja desde el Cabo de San Antonio hacia Jávea presenta sin embargo suelos más jóvenes desarrollados sobre calizas margosas (Xerorthents líticos, Soil Survey Staff, 2014), fuertemente calcáreos y donde se pudo comprobar que tras el incendio y durante el primer año la repelencia al agua se clasificaba como severa (Arcenegui et al., 2018).

Otro factor a tener en cuenta para poder pronosticar la capacidad de recuperación del suelo tras un incendio es cómo el fuego ha afectado a los agregados del suelo, o a sus agentes cementantes: raíces, hongos, restos vegetales, arcilla, que unen partículas minerales individuales en agregados de mayor tamaño, y que determinan la estabilidad del terreno ante los agentes erosivos. Un incendio muy intenso puede hacer disminuir la estabilidad de los agregados, pero si la intensidad es menor, puede aportar más componentes orgánicos que con el tiempo incluso podría mejorar la agregación. Por otro lado si se alcanzan temperaturas muy elevadas se pueden producir recristalizaciones de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y se ha comprobado que esto aumenta la resistencia de los agregados a la ruptura (Mataix-Solera et al., 2011).

### 3.2. Diseño experimental y toma de muestras.

A los 3 meses del incendio se realizaron diferentes tratamientos post-incendio de manera experimental (Tabla 1). Un tratamiento consistió en la aplicación de un acolchado sobre el suelo “mulch” utilizando para ello astilla de madera resultante de los tratamientos silvícolas. Otro tratamiento consistió en la extracción de madera quemada para lo cual, en este caso no se realizó arrastre de troncos sobre la superficie del suelo ni se empleó maquinaria pesada.

**Tabla 1. Tipos de manejos post-incendio utilizados en este estudio: control (C), saca (s) y mulch (M).**

Manejo	Descripción
Control	Se dejó tal y como quedó sin alterar el área de estudio.
Saca	Se cortó la vegetación afectada y se procedió a la extracción de la misma manualmente.
Mulch	Parte de la vegetación afectada se cortó y se dejó en la superficie del suelo, formando de esta manera un acolchado sobre la misma, no se extrajo la madera.

Se delimitaron 3 parcelas de 2x2 m para monitorización por cada tratamiento incluyendo también controles (área quemada sin tratamiento), 9 parcelas en total (Figura 6). Se realizaron muestreos a los 0 (M1), 5 (M2), 12 (M3) y 36 meses (M4) desde la aplicación de los tratamientos en septiembre del 2014. En cada muestreo se tomaron 9 muestras por tratamiento. Se han analizado un total de 108 muestras de suelo, correspondiendo 27 de ellas (Muestreo 4) a este TFG. En campo se midió la repelencia al agua (RA) por el método del test de penetración de la gota de agua.



**Figura 6. Zona de muestreo con topografía abancalada (bancales de piedra).**

En cada una de las parcelas se recogieron 3 muestras de los primeros 5 cm de suelo mineral (Figura 8), obteniéndose un total de 27 muestras por muestreo.

En el siguiente esquema podemos ver la disposición en el mapa de las parcelas para cada uno de los tratamientos, color verde para el control, color rojo para saca y color azul para mulch. También aparece el número de parcela para cada tratamiento, numeradas del 1 al 3 (Figura 7).



Figura 7. Esquema de la localización de las parcelas (Cabo de San Antonio). En verde las control, en rojo las de saca de madera y en azul las de mulch.



Figura 8. Toma de muestras (muestreo 4) en una de las parcelas asignadas al estudio. Foto: A. Palma-Bernal (2017).

Una vez tomadas las 27 muestras del suelo estas fueron secadas al aire en laboratorio y tamizadas con una luz de malla de 2 mm, excepto para la medida de los agregados estables que se usó muestra seca tamizada entre 4 mm y 0,25 mm, que corresponde a la fracción de macro-agregados.

### 3.3. Análisis de laboratorio.

En todas las muestras de suelo tomadas en campo, se analizaron los siguientes parámetros en laboratorio: Contenido total de agregados (CTA), estabilidad de agregados (EA), capacidad de campo (CC), contenido de materia orgánica (MO), contenido en nitrógeno (N), contenido en fósforo asimilable (P), pH, conductividad eléctrica (CE), carbono de la biomasa microbiana (CBM) y respiración edáfica basal (REB).

- ❖ Contenido total de agregados (CTA) y Estabilidad de agregados (EA): La determinación de 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 ( $270 \text{ J m}^{-2}$ ). Además de la estabilidad, esta determinación nos permite conocer qué porcentaje de muestra de suelo son agregados.
- ❖ Capacidad de campo (CC): La capacidad de campo se analiza siguiendo el método de Forster (1995) midiendo la cantidad de agua retenida por el suelo cuando éste está saturado al 100%. La determinación se realiza saturando el suelo con agua y dejando que drene el exceso que no sea capaz de retener.
- ❖ pH y Conductividad Eléctrica (CE): el pH fue medido en extracto acuoso con agua desionizada (1:2,5 p/v) mediante un pH-metro, la CE fue determinada también en extracto acuoso con agua desionizada (1:5 p/v) mediante un conductímetro.
- ❖ Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM): fue medido a partir del método de fumigación-extracción adaptado de Vance et al. (1987). A continuación se realiza extracción mediante sulfato potásico y se toma una medida con el espectrofotómetro UV.

- ❖ Contenido en fósforo asimilable (P): El contenido en fósforo asimilable se analiza siguiendo el método de Burriel-Hernando (Díez, 1982). Se realiza una extracción del fósforo con la disolución extractora Burriel-Hernando y a continuación se toman las medidas con el espectrofotómetro UV.
- ❖ Contenido en nitrógeno (N): El contenido en nitrógeno se determina por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982). Tras una digestión a 420°C durante 90 min se lleva a cabo una destilación y una valoración con ácido clorhídrico.
- ❖ Contenido de Materia orgánica (MO): La materia orgánica se determina mediante oxidación con dicromato potásico y posterior valoración con sulfato ferroso amónico (Walkley y Black, 1934).
- ❖ Respiración edáfica basal (REB): La respiración edáfica basal fue monitorizada con un respirómetro multisensor (Micro-Oxymax, Columbus, OH, USA).

#### 3.4. Análisis estadísticos.

Los valores de los parámetros estudiados se ajustaron a una distribución normal mediante el test Kolmogorov-Smirnov. Para conocer la evolución temporal y los efectos de los manejos post-incendio se realizó un test ANOVA. Para la separación de las medias fue realizado un test post-hoc de Tukey ( $p < 0,05$ ) asumiendo varianzas iguales. Todo el análisis estadístico fue realizado con el programa SPSS versión 24.0 (IBM SPSS statistics 2016).

#### 4. RESULTADOS

Antes de comenzar la descripción de los resultados de cada uno de los parámetros de manera individual, en la Tabla 2 mostramos la comparación estadística entre diferentes manejos post-incendio para cada uno de los muestreos realizados en el periodo de 3 años. Como se puede comprobar para el muestreo 4 que es el realizado para este estudio existen varios parámetros con diferencias significativas entre tratamientos como son: la capacidad de campo, la materia orgánica, el fósforo y la respiración edáfica basal.

**Tabla 2. Comparativa estadística entre los tratamientos para cada uno de los parámetros estudiados, comparando el manejo control (C) con la saca (S) y el mulch (M). Significancia: \*p<0,05; \*\*p<0,01; \*\*\*p<0,001 y ns: no significativo (p>0,05).**

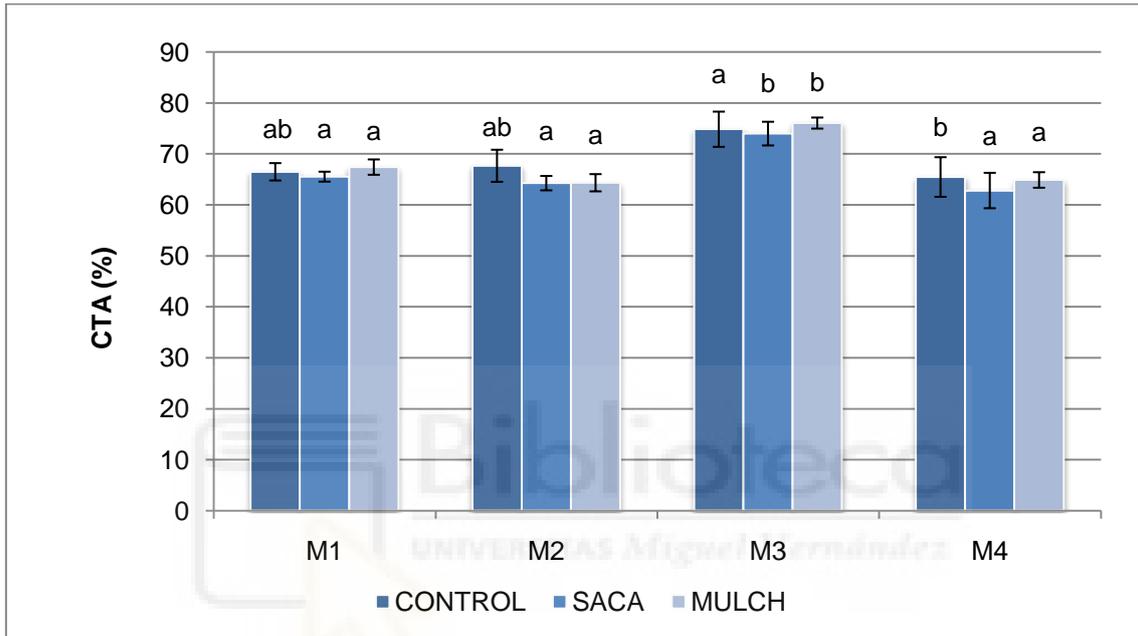
Parámetro	Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3			Muestreo 4		
	C	S	M	C	S	M	C	S	M	C	S	M
CTA		ns			ns			ns			ns	
EA		ns		a*	ab*	b*		ns			ns	
CC		ns			ns			ns		a***	a***	b***
MO	a***	b***	b***		ns		a*	b*	a*	a***	b***	a***
N		ns		a*	b*	ab*	a**	b**	ab**		ns	
P		ns			ns			ns		ab**	a**	b**
pH	a***	a***	b***	a**	b*	b*		ns			ns	
CE		ns			ns			ns			ns	
CBM		ns			ns		a***	b***	b***		ns	
REB		ns			ns		ab*	a*	b*	a**	b**	a**

Como se puede apreciar existen parámetros como el contenido total de agregados (CTA) y la conductividad eléctrica (CE) que no presentan ningún tipo de diferencia significativa estadísticamente en ninguno de los muestreos realizados.

#### 4.1. Parámetros estudiados

##### 4.1.1. Contenido total de agregados (CTA).

El contenido total de agregados no varía a lo largo del periodo de estudio como se puede apreciar en la Figura 9, manteniéndose los valores del CTA entre el 60 y el 75%. Se observa un aumento significativo del CTA en el muestreo 3 para los tres manejos, estabilizándose los niveles en el muestreo 4.



**Figura 9. Evolución temporal del contenido total de agregados (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).**

#### 4.1.2. Estabilidad de agregados (EA).

La estabilidad de agregados como podemos apreciar en la Figura 10 tras el incendio se observan valores cercanos al 90% y todos los manejos utilizados han mantenido este alto porcentaje durante los siguientes 12 meses (M3), solo se observó un aumento significativo para el tratamiento saca a los 5 meses (M2). A los 36 meses (M4) se observa una disminución significativa de la estabilidad de agregados, de hasta un 6% respecto al muestreo 1, en todos los manejos realizados.

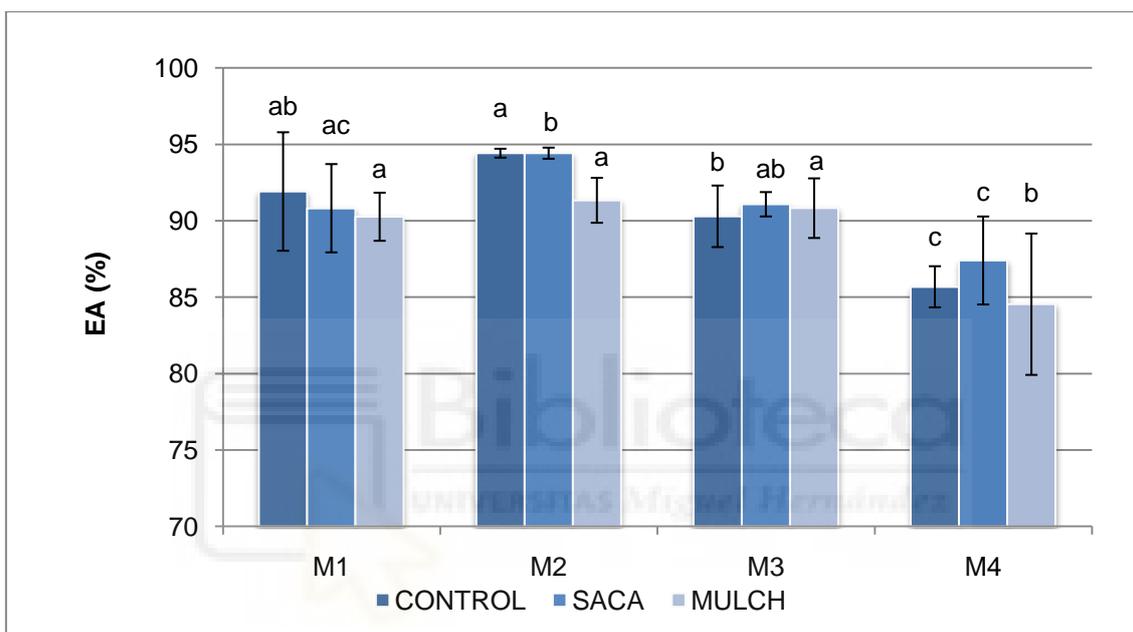


Figura 10. Evolución temporal de los agregados estables (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.3. Capacidad de campo (CC).

La capacidad de campo experimenta un descenso significativo siendo la saca el tratamiento donde este descenso es más evidente (Figura 11). Tras el descenso vemos como a los 3 años (M4) mejora la CC de los manejos recuperándose hasta un 30% más que en anteriores muestreos. Es remarcable mencionar que la saca es donde se encontraron los valores más bajos. Los valores más altos se observan en el mulch a los 36 meses (M4) del estudio.

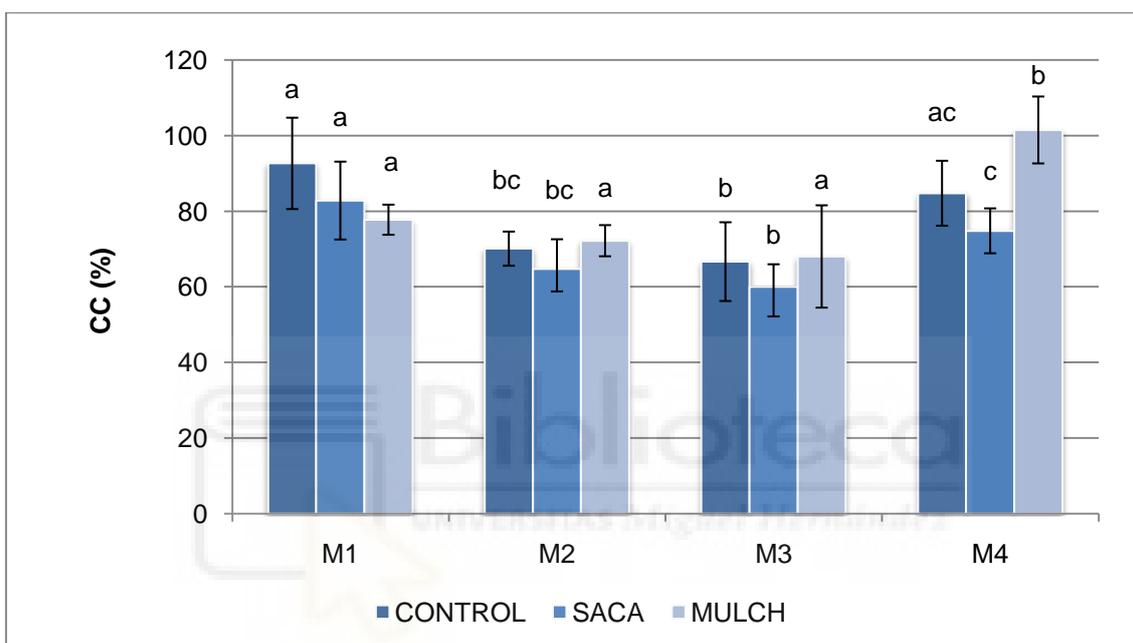


Figura 11. Evolución temporal de la capacidad de campo (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.4. Materia orgánica (MO).

El contenido de materia orgánica sufre un descenso de alrededor del 50% de la materia orgánica inicial a lo largo de los muestreos como podemos observar en la Figura 12 en todos los manejos. La materia orgánica sigue disminuyendo a lo largo de los muestreos para la saca donde vemos una disminución del 50% desde el incendio hasta el último muestreo realizado. Para el control y el mulch aun con el descenso inicial tras el incendio la materia orgánica en estos manejos se ha estabilizado incluso se puede hablar de una recuperación tras el periodo de 3 años (M4). Es importante señalar que la pérdida de materia orgánica para la saca es muy significativa y negativa para el suelo.

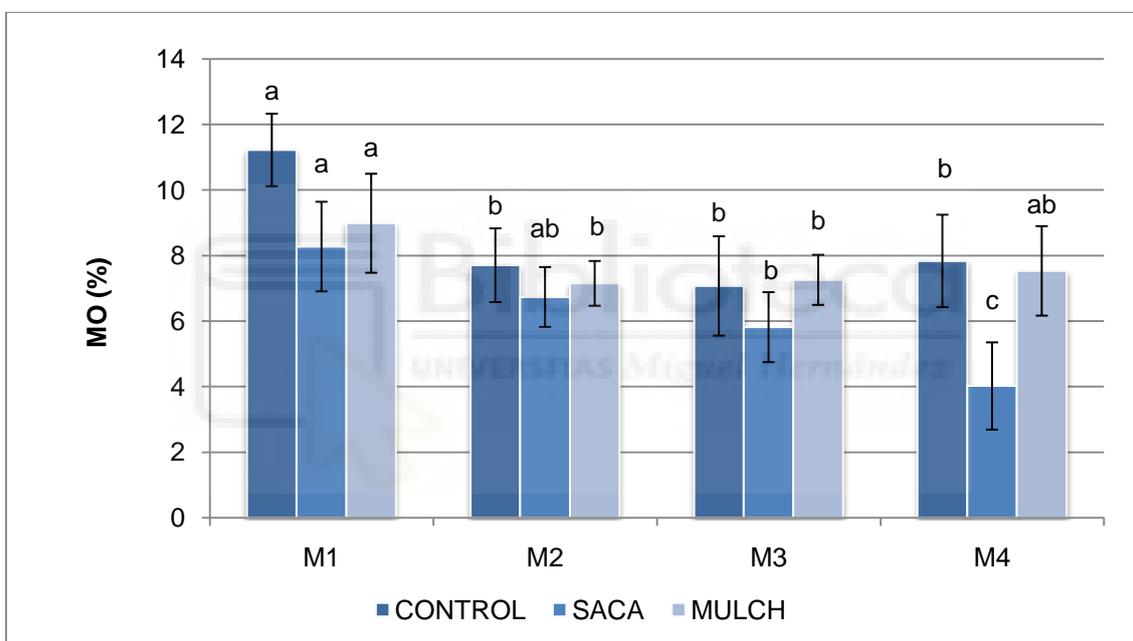


Figura 12. Evolución temporal de la materia orgánica (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.5. Nitrógeno (N).

Como podemos observar en la Figura 13 la evolución del nitrógeno tras el incendio es muy estable a lo largo del estudio pero experimenta un aumento significativo con el uso del mulch en el muestreo 4. Se puede apreciar que tanto el control como la saca no experimentan diferencias significativas a lo largo de la serie de muestreos realizados siendo niveles muy cercanos incluso para el mulch para los 3 primeros muestreos.

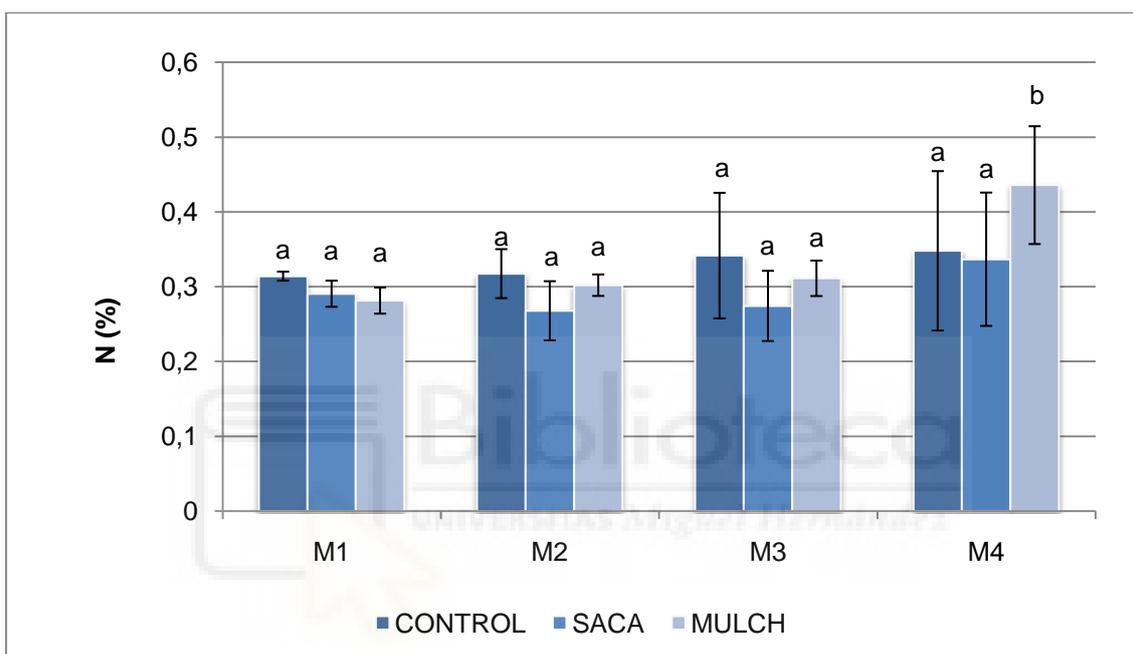


Figura 13. Evolución temporal de nitrógeno (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.6. Fósforo asimilable (P).

El fósforo asimilable se mantiene estable tras el incendio como se puede apreciar en la Figura 14 y experimenta un cambio significativo en el muestreo 3 siendo el control y el mulch los dos tratamientos donde se encontraron los valores más altos en el periodo de estudio. Los valores más bajos se observaron en el tratamiento saca pero no se encontraron diferencias significativas con los otros tratamientos debido a la gran variabilidad que presentó este parámetro.

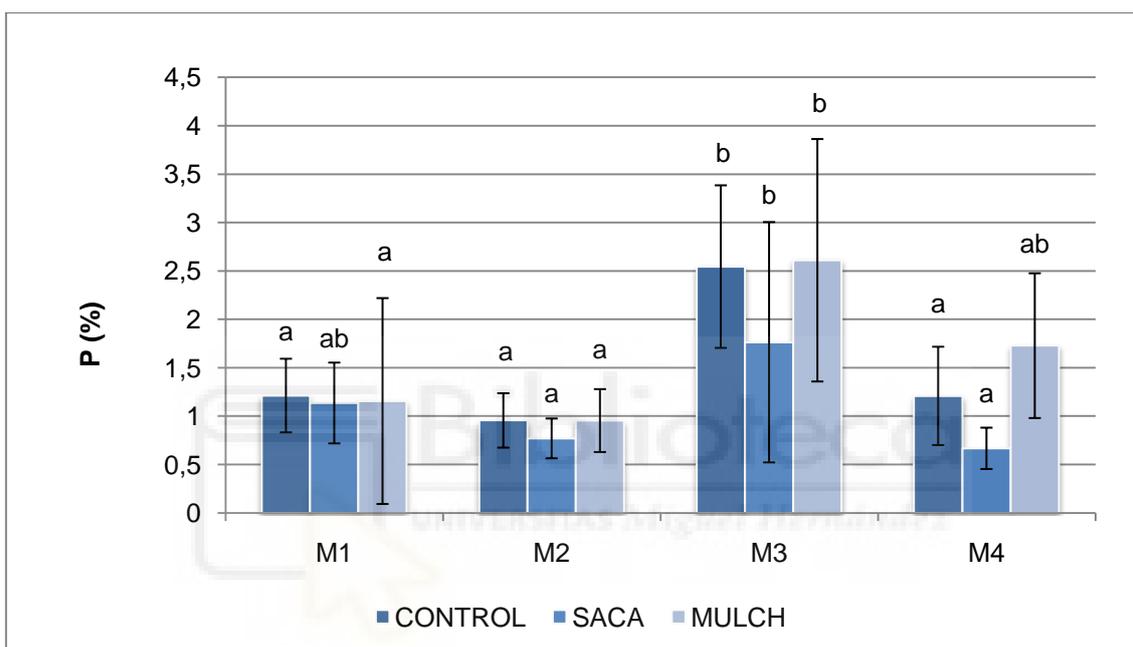


Figura 14. Evolución temporal de fósforo asimilable (%) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.7. pH.

El pH se mantiene estable a lo largo del periodo de estudio como podemos apreciar en la Figura 15 obteniendo valores en un intervalo entre un pH de 8-8,4. Si se puede apreciar un descenso en el muestreo 2 que posteriormente se recupera sin ningún problema para los 3 tipos de manejo.

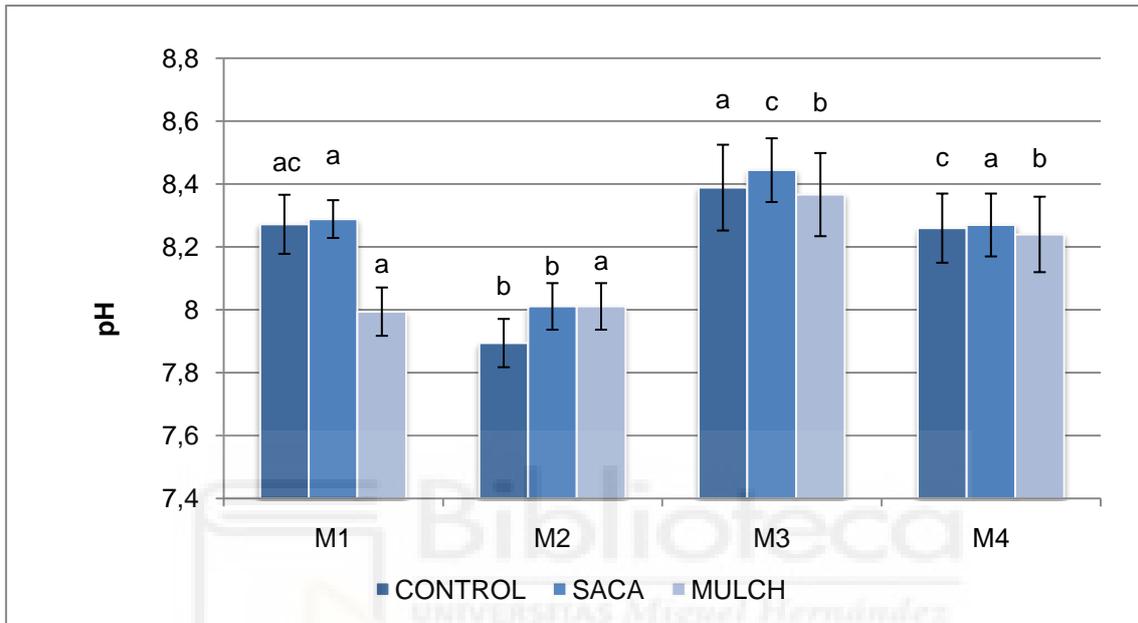


Figura 15. Evolución temporal del pH del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.8. Conductividad eléctrica (CE).

Como se puede apreciar en la Figura 16 la CE experimenta un descenso significativo tras el muestreo 2 decayendo de valores cercanos a los 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a valores de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Tras esta disminución de hasta el 50% de la conductividad eléctrica se aprecia una cierta recuperación en el muestreo 4, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas respecto al muestreo 3.

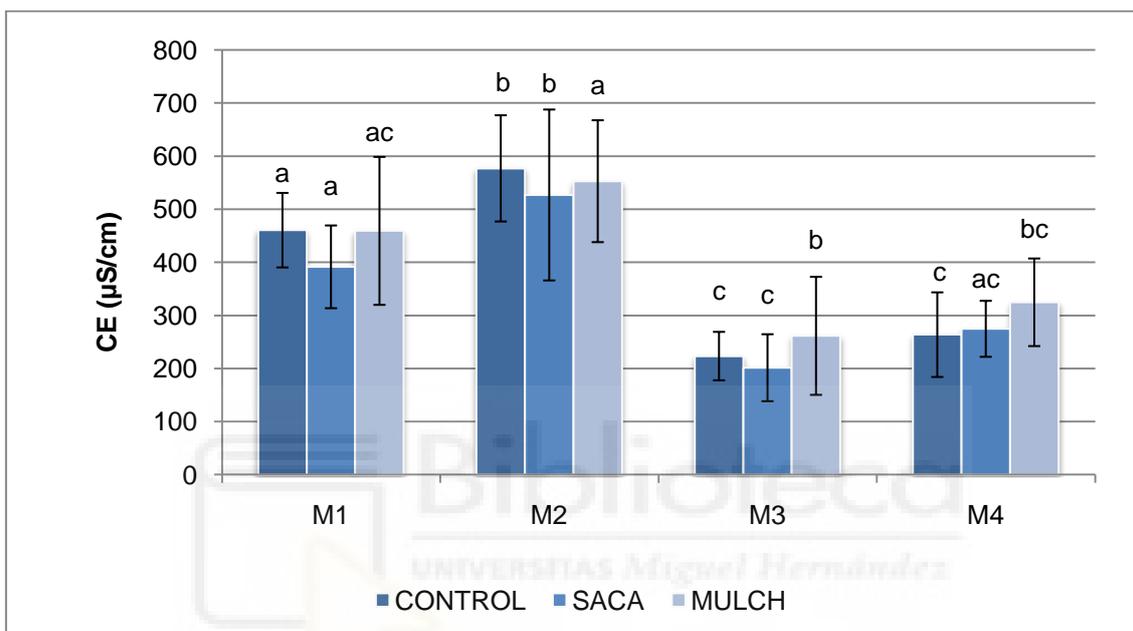


Figura 16. Evolución temporal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.9. Carbono de la biomasa microbiana (CBM).

La biomasa microbiana es uno de los parámetros más afectados por los incendios. En el muestreo uno tras el incendio la biomasa microbiana muestra valores en general bajos manteniéndose ésta estable a lo largo de la serie de muestreos sin experimentar una mejora (Figura 17). A los tres años de estudio (M4) se observa que el suelo no ha recuperado todavía de manera eficiente la CBM tras el incendio para ningún manejo de los que han sido aplicados.

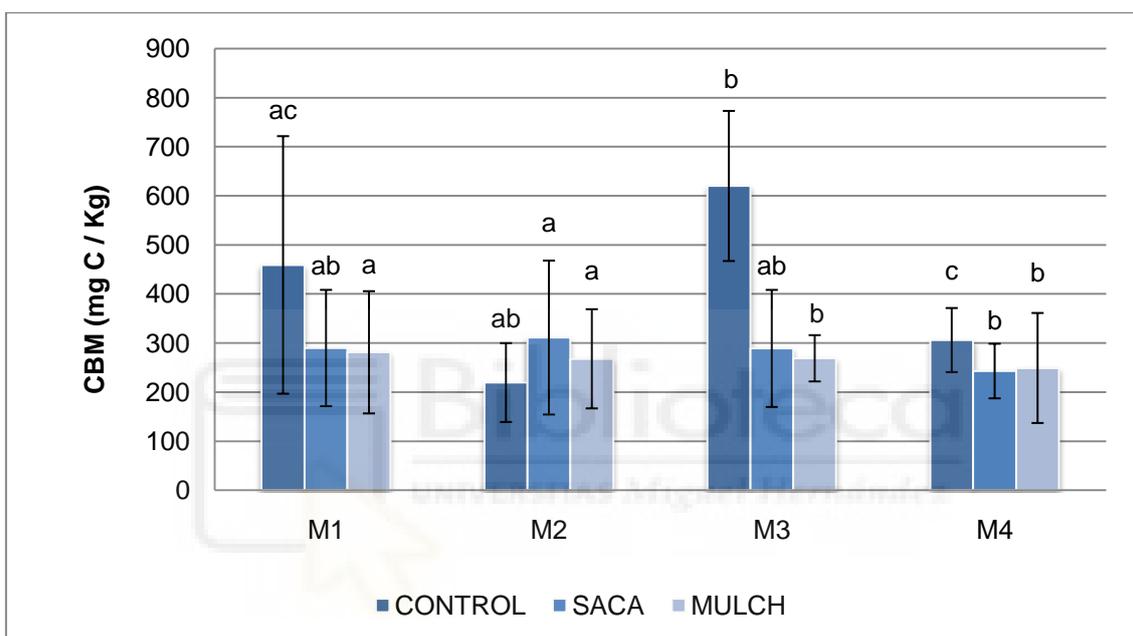


Figura 17. Evolución temporal del carbono de la biomasa (mg C / Kg) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

#### 4.1.10. Respiración edáfica basal (REB).

La respiración edáfica basal informa de la actividad microbiana y como podemos observar en la Figura 18 existe una disminución significativa a partir de los 5 meses (M2). El descenso medio de un 1  $\mu\text{g}/\text{h}/\text{g}$  en el muestreo 2 se mantiene estable hasta el muestreo 4 donde tanto en el control como en el mulch se experimenta un aumento significativo que acerca los valores a los obtenidos tras el incendio (M1). La saca es el único manejo que no experimenta una mejora con el tiempo.

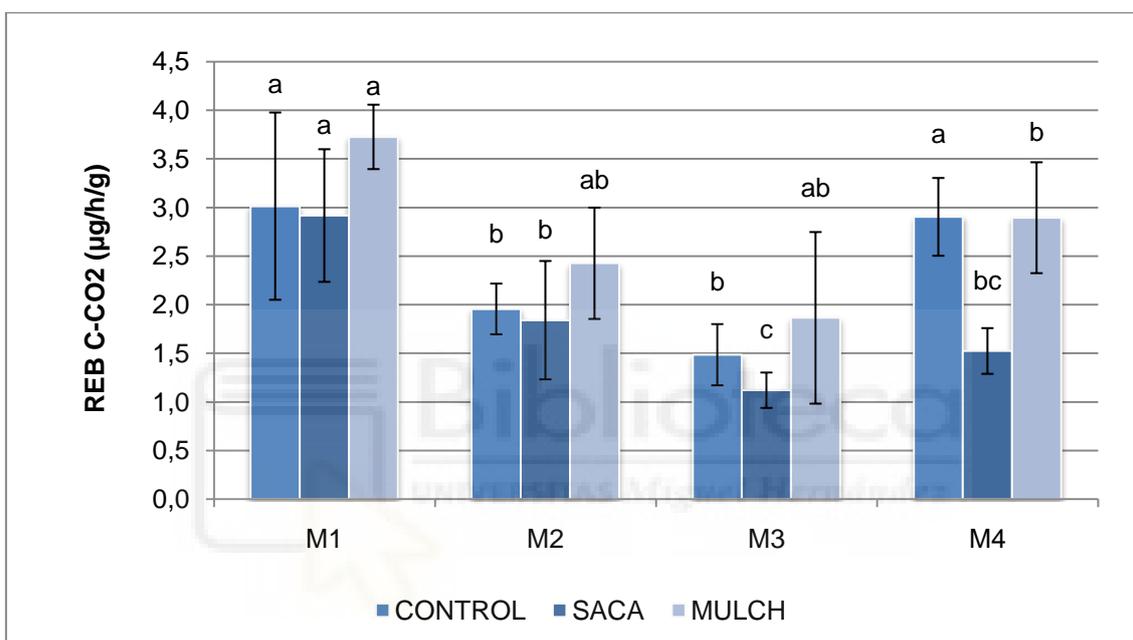


Figura 18. Evolución temporal de la respiración edáfica basal (C-CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{h}/\text{g}$ )) del suelo para los diferentes manejos post-incendio estudiados (valores medios  $\pm$  desviación estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre muestreos (M1-M4 periodo de 3 años).

## 5. DISCUSIÓN.

La importancia de un adecuado manejo post-incendio para no afectar más y ayudar a recuperar el ecosistema es crucial, y es por ello que el tratamiento idóneo para llevar a cabo está sujeto a discusión, ya que cada zona es diferente y el fuego también puede afectar más o menos, dependiendo de la intensidad del fuego, entre otros factores. Durante los últimos años ha sido la saca de la madera quemada ha sido un manejo habitual en zonas quemadas, pero se ha observado que este tratamiento no es bueno para mantener la cubierta vegetal ni permite que esta se regenere de manera natural adecuadamente. Con la saca que normalmente se realiza con maquinaria pesada se acaba ocasionando una compactación del suelo que se traduce en una pérdida de los agregados, aumento de las tasas de erosión y por tanto pérdida de calidad de los suelos (García-Orenes et al., 2017).

Por otro lado es importante saber que la madera que se extrae es una gran fuente de nutrientes que de permanecer, van liberándose de manera prolongada y lenta (Castro et al., 2013), y acabaran incorporándose en el ecosistema que ha sufrido el incendio. En nuestro estudio y a pesar de que la extracción de madera quemada no se realizó mediante arrastre de troncos y empleo de maquinaria pesada, los resultados muestran en general, que el suelo ha sido afectado en mayor medida en las parcelas con este tratamiento con respecto al control o al mulch, aun así lejos de los observados para otras zonas de estudio donde sí se empleó maquinaria y arrastre (García-Orenes et al., 2017; Castro et al., 2013).

Los resultados del contenido de materia orgánica indican que en los 3 tratamientos ha habido erosión, pero esta ha sido mayor en las parcelas donde se aplicó la saca de madera, incluso sin haber utilizado maquinaria pesada. El aumento de las tasas de erosión después de un incendio son principalmente debidos a la desaparición temporal de la cubierta vegetal (De las Heras, 1994; Espelta et al., 2003; Herranz et al., 1997), los posibles cambios producidos en las propiedades del suelo que lo hacen más vulnerable a la erosión (Donato et al., 2006; Lindenmayer y Noss, 2006), y especialmente en los casos en los que el fuego ha inducido la aparición o aumento de la repelencia al agua o hidrofobicidad (Doerr et al., 2000). En nuestra zona de estudio se registraron valores de repelencia al agua en campo muy elevados y clasificados como severos durante el primer año tras el fuego (Arcenegui et al., 2018).

Durante los 3 años de seguimiento hemos observado que la biomasa microbiana no se ha recuperado bien en ninguno de los tratamientos. La población microbiana es muy sensible al calor producido por el incendio, y dependiendo de las temperatura alcanzada en los incendios y la duración del mismo se puede alterar notablemente (Mataix-Solera et al., 2009). La zona de estudio sufrió el primer año una sequía mayor de la habitual y esto también puede haber afectado.

Sin embargo si se observa un pequeño aumento de actividad microbiana en los tratamientos control y mulch que puede estar motivado por una mayor conservación de la humedad del suelo gracias a los troncos caídos en el control y al acolchado de astilla de madera del mulch, además de los aportes de nutrientes que realizan las propias cenizas del incendio (Harmon et al., 1986; Grove, 2003; Maser y Trappe, 1984), que se habrán conservado más en estas parcelas y erosionado más en las de saca. El hecho de dejar los troncos quemados sobre el suelo además de suponer un aporte de nutrientes constante a lo largo de los años (Harmon et al., 1986) favorece también la actividad microbiana (Coleman et al., 2004).

De nuestro estudio hemos obtenido valores que determinan que frente a la saca el control mantiene unos parámetros mejores a lo largo del periodo de estudio, pero es el mulch el tratamiento que mejores resultados nos ha dado con una mejora en algunos de las propiedades estudiadas como el contenido de nitrógeno del suelo y la capacidad de campo que es clave para la recuperación de la vegetación cuando la limitación para el desarrollo de la misma es el agua, y de esta manera se reducen las pérdidas por erosión.

En cuanto al mulch la aplicación de la astilla de madera reduce la pérdida del agua del suelo. Las condiciones son mejores como podemos ver con el aumento de la capacidad de campo y por tanto se reduce la desecación que existiría si el suelo estuviera desnudo recibiendo más radiación solar directa, más calentamiento y por tanto temperaturas más altas.

La extracción de la madera mediante la saca también puede afectar de manera negativa a la regeneración vegetal ya que se extraen semillas que en parte son encargadas de recuperar la flora del suelo, estas consecuencias de pérdida de la cobertura vegetal han sido estudiados por varios autores como Wagenbrenner et al. (2016). En cuanto al uso de mulch todavía es necesario continuar realizando más estudios, pero en este se ha comprobado que es el manejo que mejores resultados ha dado y que por lo tanto es el más aconsejable a aplicar para preservar las propiedades del suelo, frenar la erosión y de esta manera evitar la degradación tras un incendio.

En el caso de que los árboles no molesten también se puede valorar dejar la zona sin intervención como hemos comprobado en el control ya que los valores obtenidos siguen siendo mejores que para la saca y el coste económico es el menor para la administración.

## **6. CONCLUSIONES.**

Como conclusión principal tras analizar los resultados podemos decir que el incendio ha provocado un descenso del contenido de materia orgánica del suelo a corto plazo pero se aprecia una recuperación en el último muestreo. Esto significa que tras el incendio las tasas de erosión aumentaron y ahora tras un periodo de 3 años el suelo se está recuperando. Dicho descenso se vio intensificado en las zonas donde el manejo aplicado fue la saca, aunque la extracción de la madera se hiciera a mano sin uso de maquinaria. Otro de los parámetros que se ha visto afectado por la saca de la madera quemada de la zona ha sido la respiración edáfica basal o lo que es lo mismo la actividad microbiana del suelo. También es remarcable decir que el suelo se ha mantenido mejor tras el tratamiento con mulch de astillas de madera y ha mejorado en varios parámetros como son el contenido en nitrógeno y la capacidad de retención del agua en el suelo. El control es el tratamiento que menos cambios significativos ha mostrado a lo largo del estudio.

## 7. PROYECCIÓN FUTURA.

Tras los resultados arrojados por nuestro estudio podemos afirmar que para el suelo estudiado (Xerorthent lítico) desarrollado sobre calizas margosas y con un clima típico mediterráneo, no es recomendable como tratamiento post-incendio la saca de madera ya que se favorece la erosión y por tanto la degradación del suelo. Son necesarios más estudios en otras zonas con otras condiciones para precisar si este tratamiento siempre produce un efecto negativo. En cualquier caso la extracción de madera quemada debería tratar de evitarse y en el estricto caso de ser necesario habría que estudiar si una aplicación inmediata de acolchado consigue frenar los procesos de degradación.

En los casos donde ya se ha producido erosión y degradación del suelo sería recomendable la aplicación de algún sustrato orgánico tipo compost para ayudar a la regeneración de las propiedades del suelo y por tanto del ecosistema.

Reducir el número de variables o parámetros para poder monitorizar de manera más fácil la evolución del suelo afectado es también un reto para futuras investigaciones.



## 8. 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*, Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 79-90.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Alagna, V., García-Orenes, F., Palma, A., Lopez-Caravaca, A., Mataix-Beneyto, J., 2018. The importance of post-fire management on soil properties: a study case in Montgó Natural Park. Libro de abstracts del VIII Congreso ibérico de las ciencias del suelo, pp. 359-362.
- 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.
- Bautista, S., Bellot, J., Vallejo, VR. 1996. Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem. *Arid. Soil res. Rehab.* 10, 235-242.
- 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.
- Bremner, J.M., Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen total. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds), *Methods os Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, pp. 595-624.
- Castro, J., Leverkus, A.B., Marañón-Jiménez, S., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.P., Reverter, R., Guzmán-Álvarez, J.R. y Kowalsky, A.S. (2013). Efecto del manejo de la madera quemada sobre la restauración y regeneración postincendio: implicaciones para la gestión y para el conjunto del ecosistema.
- Cerdà, A. 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrol. Process.* 12, 1031-1042.
- Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10.
- Coleman, D.C., Crossley Jr., D.A., Hendrix, P.F., 2004. *Fundamentals of Soil Ecology*. Esevier/Academic Press, Boston.

- De las Heras, J. 1994. Sucesión de la vegetación briofítica en bosques incendiados del Sistema Alcaraz-Segura-Cazorla (SW de Albacete). En: Instituto de Estudios Albacetenses, Albacete, pp. 158.
- 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., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51, 33–65.
- 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.
- Espelta, J.M., Retana, J. y Habrouk, A. 2003. Resprouting patterns after fire and response to stool cleaning of two coexisting Mediterranean oaks with contrasting leaf habits on two different sites. *Forest Ecology and Management*. 179, 401-414.
- Fernández, C., Vega, J.A., Jiménez, E., Fonturbel, T. 2011. Effectiveness of three postfire treatments at reducing soil erosion in Galicia (NW Spain). *Int. J. Wildland fire*. 20, 104–114.
- 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.
- 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.
- 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.
- Herranz, J.M., De las Heras, J. y Martínez-Sánchez, J.J. 1991. Efecto de la orientación sobre la recuperación de la vegetación natural tras el fuego en el valle del Río Tus (Yeste, Albacete). *Ecología.* 5, 111-123.
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 79, 207-219.
- Lindenmayer, D.B., Noss, R.F., 2006. Salvage logging ecosystem processes, and biodiversity conservation. *Conserv. Biol.* 20, 949-958.
- 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., Navarro, M.A., Zornoza, R., Guerrero, C., Gómez, I., García-Orenes, F., Bárcenas, G.M., 2008a. Fire effects on soil organic carbon in turn affecting physical, chemical and biochemical soil properties. *Geophysical Research Abstracts.* 10, 01280.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Jordán, M.M., Dlapa, P., Tessler, N., Wittenberg, L., 2008b. Can terra rossa become water repellent by burning? A laboratory approach. *Geoderma.* 147, 178–184.
- 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., 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.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, LM. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-science reviews.* 109, 44-60.

- McNeil, J. 1992. The mountains of the Mediterranean world. An environmental history. Cambridge University Press, pp 423.
- 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.
- Pereg, L., Mataix-Solera, J., McMillan, M., García-Orenes, F. 2018. The impact of post-fire salvage logging on microbial nitrogen cyclers in Mediterranean forest soil. Science of the total environment. 619-620, 1079-1087
- 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.
- Roldán, A., García-Orenes, F. y Lax, A. (1994). An incubation experiment to determinate factors involving aggregation changes in an arid soil receiving urban refuse. Soil Biol. Biochem. 26,1699-1707.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. NRCS, 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.
- 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.
- 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.
- Walkley, A. y Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37,29-38. World Resources Institute, & The United Nations Environment Programme. (1996). World Resources 1996-97. New York, NY, USA: Oxford University Press.
- World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

