



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

UNIVERSITAS
Miguel Hernández



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

Estudio de los efectos de la aparición de musgos en la fertilidad de suelos afectados por distintos tratamientos post- incendio en plantación de eucalipto en Coimbra.



Jesús Rovira del Pino

2021/2022

Tutoras: Fuensanta García Orenes y Minerva García
Carmona
Departamento de agroquímica y medio ambiente
Facultad de Ciencias Experimentales
Universidad Miguel Hernández

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Problemática de los incendios forestales.....	7
1.2. Efectos y consecuencias de los incendios forestales en las propiedades biológicas y minerales de los suelos.....	8
1.3. Tratamientos post-incendio	11
1.4. Costras biológicas e incendios forestales.....	12
2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Descripción del área de estudio	15
3.1.1. Ubicación de la zona afectada.....	15
3.1.2. Clima.....	16
3.1.3. Vegetación.....	17
3.1.4. Suelos y geología.....	17
3.2. Manejos post-incendio, diseño experimental y muestreo.....	18
3.3. Análisis y laboratorio.....	20
3.3.1. Carbono orgánico oxidable	20

3.3.2. Nitrógeno.....	21
3.3.3. Fosforo.....	22
3.3.4. Respiración edáfica basal y carbono de la biomasa.....	22
3.4. Análisis estadístico.....	23
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Carbono orgánico del suelo.....	23
4.2. Nitrógeno.....	24
4.3. Fósforo disponible.....	26
4.4. Respiración Edáfica basal.....	27
4.5. Biomasa microbiana.....	28
5. DISCUSIÓN.....	29
6. CONCLUSIONES Y PROYECCIONES FUTURAS.....	31
7. BIBLIOGRAFÍA.....	32

RESUMEN

Los incendios forestales son cada vez más frecuentes debidos a los numerosos factores que los provocan. Una vez se ha producido el incendio, el suelo queda expuesto a agentes erosionables y a la pérdida de las propiedades edáficas, por ello es de vital importancia minimizar los daños producidos tras un incendio forestal. Los manejos post-incendio pueden ser la solución a este problema, aunque diversos estudios indican que las biocostras, que son los primeros colonizadores del suelo tras un incendio forestal, pueden ser de especial utilidad en la protección de las propiedades edáficas del suelo. Por ello en nuestro estudio, se pretende comparar los efectos de los musgos en la fertilidad del suelo bajo distintos tratamientos como son, la tala y saca de madera y la aplicación de mulch en una plantación de cultivos de *Eucalyptus globulus* lábil en Coímbra, Portugal. Para ello, se han comparado los distintos manejos con suelos en los que contienen musgo y en los que no, con las distintas propiedades como son el CO, N, P, REB y la biomasa microbiana. Respecto a los resultados, no han sido los esperados, ya que se ha concluido un aumento de nutrientes en ambos manejos en los suelos en los que no se detectó presencia de biocostra. Aunque, hay un aumento del valor de la REB, en los suelos donde hay presencia de biocostra en el tratamiento de tala y saca de madera. También es el caso de la presencia de la biomasa microbiana, donde este valor se incrementa en los suelos donde hay presencia de musgo. Por último, en el control del tratamiento de acolchado, aumenta en los valores de todas las propiedades edáficas en los suelos donde hay presencia de biocostra. Para finalizar, sería recomendable un estudio exhaustivo del papel del musgo en las propiedades edáficas, en distintos suelos después de producirse un incendio, debido a la complejidad de estudio de estos organismos.

Palabras clave: Biocostra, propiedades edáficas, manejos post-incendio, incendios forestales, musgo, tala y saca, aplicación de mulch.

ABSTRACT

Forest fires are becoming more and more frequent due to the numerous factors that cause them. Once the fire has occurred, the soil is exposed to erodible agents and the loss of edaphic properties, so it is of vital importance to minimize the damage produced after a forest fire. Post-fire management can be the solution to this problem, although several studies indicate that biocrusts, which are the first colonizers of the soil after a forest fire, can be particularly useful in protecting the edaphic properties of the soil. Therefore, our study aims to compare the effects of mosses on soil fertility under different treatments such as felling and harvesting of wood and mulching in a plantation of *Eucalyptus globulus* labill in Coimbra, Portugal. For this purpose, the different management methods were compared with soils containing moss and soils without moss, with different properties such as CO, N, P, REB and microbial biomass. Regarding the results, they have not been as expected, since it has been concluded an increase of nutrients in both managements in soils in which biocrusts presence was not detected. Although, there is an increase in the REB value, in soils where there is presence of biocrusts in the slash-and-burn treatment. This is also the case for the presence of microbial biomass, where this value increases in soils where moss is present. Finally, in the control of mulching treatment, the values of all edaphic properties increase in soils where biocrusts is present. Finally, an exhaustive study of the role of moss on edaphic properties in different soils after a fire would be advisable, due to the complexity of the study of these organisms.

Key words: Biocrusts, edaphic properties, post-fire management, forest fires, moss, slash and burn, mulching.

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras:

- **Figura 1:** Diagrama de suelo (Fuente: American planning association, 2016).
- **Figura 2:** Efecto del fuego en el ciclo de los nutrientes. (extraído de: Mataix Solera, 2000. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración).
- **Figura 3:** El fuego y el ciclo del nitrógeno.
- **Figura 4:** Costras biológicas.
- **Figura 5:** Representación gráfica de las principales especies forestales en Portugal en el año 2015.
- **Figura 6:** Mapa de Vale de Colmeias en el municipio de Miranda do Corvo.
- **Figura 7:** Bosque de Eucalyptus globulus Labill del Vale de Colmeias en el municipio de Miranda do Corvo.
- **Figura 8:** Suelos y geología de la zona de estudio donde se produjo el incendio.
- **Figura 9:** Zona de estudio de tala y saca de madera. a) Control sin saca de madera. B) efectos de las pasadas de la maquinaria en la saca de madera. C) efectos de las pasadas de la maquinaria en la saca de madera.
- **Figura 10:** Zona de estudio donde se ha aplicado mulch. En la parte izquierda se observa la aplicación estándar de mulch y en la derecha la dosis baja de mulch.
- **Figura 11:** Valoración con Sal de Mohr en la determinación de carbono orgánico.
- **Figura 12:** Digestión del nitrógeno mediante el método del Nitrógeno Kjeldahl.
- **Figura 13:** Muestras de las disoluciones del fosforo.
- **Figura 14:** Carbono orgánico del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).
- **Figura 15:** Nitrógeno del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

- **Figura 16:** Fosforo del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).
- **Figura 17:** Respiración basal del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).
- **Figura 18:** Biomasa microbiana del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

Tablas:

- **Tabla 1:** Climograma de la zona de Coimbra (Portugal).
- **Tabla 2:** Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el carbono orgánico del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.
- **Tabla 3:** Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el nitrógeno del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.
- **Tabla 4:** Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el fósforo del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.
- **Tabla 5:** Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para la respiración basal del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.
- **Tabla 6.** Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para la biomasa microbiana del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática de los incendios forestales

Los incendios forestales son aquellos incendios que se propagan sin control en masas forestales. El fuego es parte natural de la dinámica de los ecosistemas terrestres, jugando un papel fundamental en la evolución y estructura de las especies, de igual forma en los ecosistemas Mediterráneos (Naveh, 1975). Entre otros, los mecanismos de resistencia al fuego son el rebrote y la germinación, presentes en multitud de especies mediterráneas. A pesar de ser un factor natural, la acción antrópica ha modificado históricamente su frecuencia, ya que lo ha utilizado de manera asidua para regenerar pastos, crear espacios abiertos, cazar, defenderse, etc., siendo una herramienta muy útil en la gestión del medio natural. Sin embargo, actualmente, el fuego supone un problema ya que está percibido por la sociedad como una amenaza y no como un factor ecológico (Mataix-Solera y Cerdá, 2009). Esto se debe a un cambio en el modo de vida de la población que ha provocado una alteración en el régimen de incendios, es decir, la periodicidad con la que se producen y las características de estos (virulencia, severidad). Cuando los incendios se vuelven más recurrentes o son más intensos pueden superar la resiliencia del ecosistema y llevar a cambios irreversibles (Bodí et al., 2012).

En los países del sur de Europa, se produjo en los años 60 un cambio de modelo industrial, impulsó un rápido éxodo rural, moviéndose a la ciudad, produciéndose un abandono de campos de cultivos y pastos. Como consecuencia de este abandono, sin la recogida de leñas de los bosques, se fue incrementando el combustible forestal por la recolonización de zonas abandonadas, antes aprovechadas para la madera (Naredo, 2004). Este aumento en combustible en los bosques y la pérdida de diversidad favorece la propagación de incendios de alta intensidad. A este factor se le suma las políticas de reforestación monoespecíficas, creando masas extensas homogéneas (fácilmente combustibles), y las políticas de supresión de incendios total, que ha favorecido la acumulación sin precedentes de combustible, detonante de grandes incendios forestales (Mataix-Solera y Cerdà, 2009). Los grandes incendios forestales pueden tener consecuencias desastrosas para ecosistemas de alto valor ecológico, cultural y económico.

Portugal es uno de los países de Europa que han sido más afectados por los incendios. Se calcula que los incendios queman al año 100000 ha, siendo ésta la causa más importante en

los cambios de uso de suelo (Cardoso Pereira et. Al.,2006). Son varios los factores que están detrás de los incendios forestales en Portugal, principalmente los siguientes (CEPADA, 2003):

- Una de las principales causas es que en este país las especies predominantes son el cultivo de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus labill*). Debido a sus resinas y aceites naturales, convierten a estas especies en potencialmente inflamables (INE, 2012). Además, las zonas ocupadas por el cultivo de estas especies arbóreas provocan que sean más susceptibles a los incendios que otras zonas ocupadas por especies autóctonas como el alcornoque, encina etc. Un dato preocupante es la rápida expansión del eucalipto, que está desplazando a las especies endémicas, lo que lleva años preocupando a Portugal. Pero esta especie proporciona a la industria portuguesa materia prima, representando sus exportaciones un 1,5 % del producto interior bruto, riqueza que necesita el país con precariedad (Jochen Faget, 09/2020). Estas ganancias han provocado que los agricultores sustituyan las especies autóctonas, de crecimiento lento, por el eucalipto, de crecimiento más rápido, lo que los lleva a tener ganancias rápidas. La realidad es que en Portugal más de una cuarta parte de la masa forestal pertenece a esta especie australiana, árbol que se ha proclamado como la especie arbórea más importante y predominante del país.
- Un factor preocupante son los incendios provocados por acción antropogénica, que son comunes y raramente se penalizan. Estos fuegos tienen dos principales raíces: 1º Los intereses personales y económicos y 2º los pirómanos.
- La siguiente causa, es debido a que toda la zona forestal y rural está deteriorada en términos antropogénicos. Quiere decir que los habitantes de los espacios rurales han emigrado a las ciudades, esta población era la primera fuerza de prevención y lucha contra los incendios.
- Por último, el cambio climático favorece la aparición de fuegos y dado que en Portugal se está volviendo más caluroso y con un clima más seco, los incendios forestales podrían repetirse más a menudo.

1.2. Efectos y consecuencias de los incendios forestales en las propiedades biológicas y minerales de los suelos.

Para poder entender los efectos y consecuencias de los incendios forestales en los suelos, primero hay que comprender, que es el suelo. Según el Diccionario Multilingüe de la

Ciencia del Suelo, el suelo puede ser definido como “Cuerpo natural que se ha formado en la superficie terrestre, tiene por componentes materiales minerales (menores o iguales a 2 mm), fragmentos de roca (mayores de 2 mm) y materiales orgánicos. En su espacio poroso puede contener líquidos, gases y organismos vivos. Tiene aptitud para: 1) sustentar los ecosistemas terrestres al permitir el crecimiento de las plantas y otros organismos, a los que suministra nutrientes, oxígeno, agua y anclaje o, en su caso, hábitat; y 2) desarrollar un conjunto de funciones ambientales y proveer servicios ecosistémicos” (Porta, s.f.).

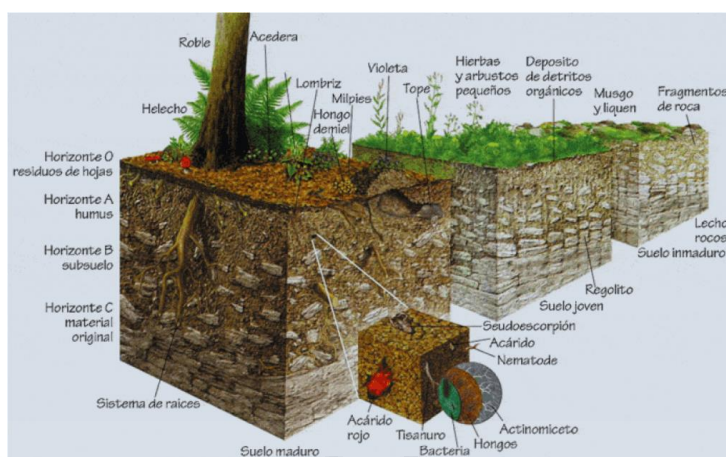


Figura 1. Diagrama de suelo (Fuente: American planning association, 2016).

Los incendios forestales pueden llegar a provocar una serie de efectos directos e indirectos sobre el suelo; los primeros se producen como consecuencia del calentamiento, mientras que los segundos son el resultado de las nuevas condiciones microclimáticas que predominan tras la eliminación de la cubierta vegetal y la adición de la capa de cenizas (Bodí et al., 2012). Estos impactos van a depender de la duración del incendio, de su intensidad y la recurrencia, además de la topografía del lugar (Certini, 2005).

A continuación, se expondrá como afecta los incendios a las propiedades del suelo.

Efectos en la materia orgánica: La calcinación de la materia orgánica afecta negativamente a las propiedades edáficas, produciendo inestabilidad a los ciclos biológicos, cuya recuperación puede alargarse, dependiendo de las situaciones que se han producido (intensidad y duración del incendio). Además, la combustión de materia orgánica llega a afectar al desarrollo de la nueva cubierta vegetal que se produzca en el suelo. Por lo tanto, los incendios no solo afectan a la materia orgánica de forma cuantitativa, sino también de manera cualitativa, aumentando las repercusiones ecológicas (Mataix Solera, 2000).

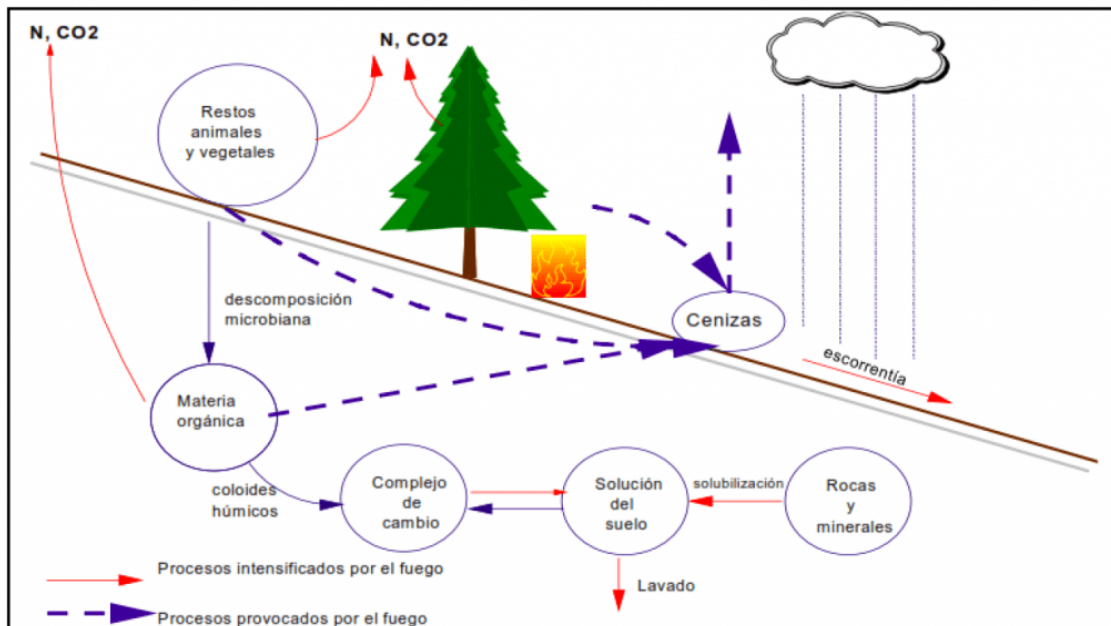


Figura 2: Efecto del fuego en el ciclo de los nutrientes. (extraído de: Mataix Solera, 2000. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración).



Efectos sobre los microorganismos del suelo: Los efectos directos del fuego provocan la muerte celular, reducción en la biomasa microbiana, menor actividad, y cambios en la composición de las comunidades y la diversidad. La recuperación de las comunidades depende indirectamente del estado de las propiedades del suelo (cambios en el pH, contenido en nutrientes, etc.), así como la recolonización de las plantas (Mataix-Solera et al., 2009).

Efectos sobre el ciclo del nitrógeno del suelo: El fuego altera los ciclos del suelo y en especial el del nitrógeno. Estas alteraciones pueden ser directas, debido a la volatilización y al consumo del nitrógeno orgánico almacenado en el humus (Mataix Solera et al., 1999b). Paralelamente, se produce efectos indirectos, estas perturbaciones son causa de la alteración de las características físicas y químicas del suelo que, además, condicionan los ciclos del nitrógeno.

Por otro lado, existen técnicas de emergencia de estabilización. El tratamiento post-incendio es un elemento importante para reducir el riesgo de erosión frente a agentes externos, principalmente lluvia en los ecosistemas Mediterráneos, y para impulsar la capacidad de recuperación del suelo. Existen una variedad de manejos post-incendios, estos tratamientos se pueden clasificar en tres tipos dependiendo del propósito que se pretenda aspirar, del estado del suelo después del incendio y de igual forma se deberán tener en cuenta las particularidades climáticas, topográficas y las propiedades hidrológicas de cada zona (Guerrero et al., 2007; Robichaud, 2009). El acolchado es una técnica, que mediante el empleo de residuos orgánicos en la superficie del terreno se pretende aumentar la protección del suelo. La utilización de barreras físicas en laderas y/o arroyos sirve para mejorar la recuperación de las especies vegetativas, o en la retención de la escorrentía. Por último, el empleo de cubiertas protectoras, es una técnica ampliamente utilizada que evita la erosión del suelo (Robichaud et al., 2000, 2013; Girona-García et al., 2021).

Aunque la eficacia de los manejos para reducir la erosión del suelo está ampliamente fundamentada, sus implicaciones a mediano plazo en la restauración de las características físico-químicas del suelo están apenas documentadas. Todas las técnicas posteriores al incendio tienen sus beneficios y desventajas, se llega a determinar que se requieren más esfuerzos para realizar más estudios de campo, sobre todo a escalas más grandes y a una mayor diversidad de emplazamientos geográficos, poner en práctica nuevas técnicas y distintas combinaciones de medidas para asegurar que haya un óptimo resultado después de los incendios forestales (Girona-García et al., 2021).

1.3. Costras biológicas e incendios forestales

Las costras biológicas del suelo se definen como una comunidad de organismos que viven en la superficie del suelo, compuestos principalmente de cianobacterias, hongos, algas, briófitos, dividiéndose en dos grupos, microscópicos y macroscópicos. Además, son ampliamente distribuidos en el mundo, generalmente cubren el 40-100% del terreno abierto en climas secos tolerando los entornos más adversos (Belnap et al., 2003). Las biocostras tienen una función clave en los ecosistemas, ya que mejoran su bienestar y su desempeño, mejorando la estructura y la estabilidad del suelo, contribuyendo en los ciclos hidrológicos del terreno, interviniendo en la productividad del suelo o aumentando la comunidad microbiana (Belnap y Lange, 2013). Tras incendios forestales, se ha podido observar que las biocostras dominadas

por musgos son colonizadoras tempranas, estas especies colonizan rápidamente el terreno afectado por un incendio forestal (Esposito, 1999).

Una vez finalizado el incendio forestal, las costras biológicas se denominan como los primeros colonizadores antes del crecimiento de las plantas vasculares (Esposito, 1999). Esta colonización temprana puede estar relacionada con la amplia propagación de las esporas, como con la capacidad de adaptación sobre sustratos inestables (carbón vegetal y capa de ceniza) mediante un alto desarrollo protonémico. Algunos de los efectos positivos en el suelo incluyen la absorción de la humedad y la temperatura del suelo (Xiao et al., 2016), incremento de la estabilidad del agregado (Chamizo et al., 2012), fijación del carbono y nitrógeno atmosféricos (Elbert et al., 2012) beneficia la actividad microbiana del suelo (Liu et al., 2013), retiene la materia orgánica del suelo y evita la pérdida del carbono orgánico (Chamizo et al., 2017). Por lo tanto, tras un incendio forestal, se espera que la aparición temprana de la biocostra favorezca la recuperación del suelo. Se ha podido observar que la presencia de una capa de costra biológica fija en la superficie del suelo lo protege eficientemente frente a la erosión del agua en ausencia de vegetación después de un incendio forestal (Silva et al., 2019). Al darle mayor estabilidad al suelo se espera que aumente la fertilidad bajo las biocostras como ha podido ser observado con anterioridad en otros ecosistemas como los Mediterráneos semi-áridos (García-Carmona et al., 2020). En zonas que tienen un clima con influencia oceánica, se tienen pocos datos sobre el papel para la estabilización del suelo ante la aparición de musgos, como es el caso de Portugal, y menos aún en la fertilidad del suelo y las propiedades biológicas.



Figura 4: Foto detalle de costra biológica dominada por musgo tras incendio.

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Para este trabajo, se estudió el incendio que tuvo lugar en Vale de Colmeias, ubicado en el municipio Miranda do Corvo del Distrito de Coímbra en centro-norte de Portugal. El incendio ocurrió en agosto de 2015, afectando a una superficie total de 715 ha. La zona donde se produjo el incendio tuvo lugar en una plantación de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*), teniendo una consideración de severidad moderada. No obstante, los daños fueron principalmente económicos ya que la industria portuguesa utiliza el eucalipto para materia prima, representando sus exportaciones un 1,5% del producto interior bruto. Las causas de este incendio fueron principalmente humanas, debido a la plantación generalizada de especies arbóreas propensas al fuego y ocupando una cuarta parte del terreno forestal portugués, además de sustituir a las especies endémicas resistentes al clima de la zona.

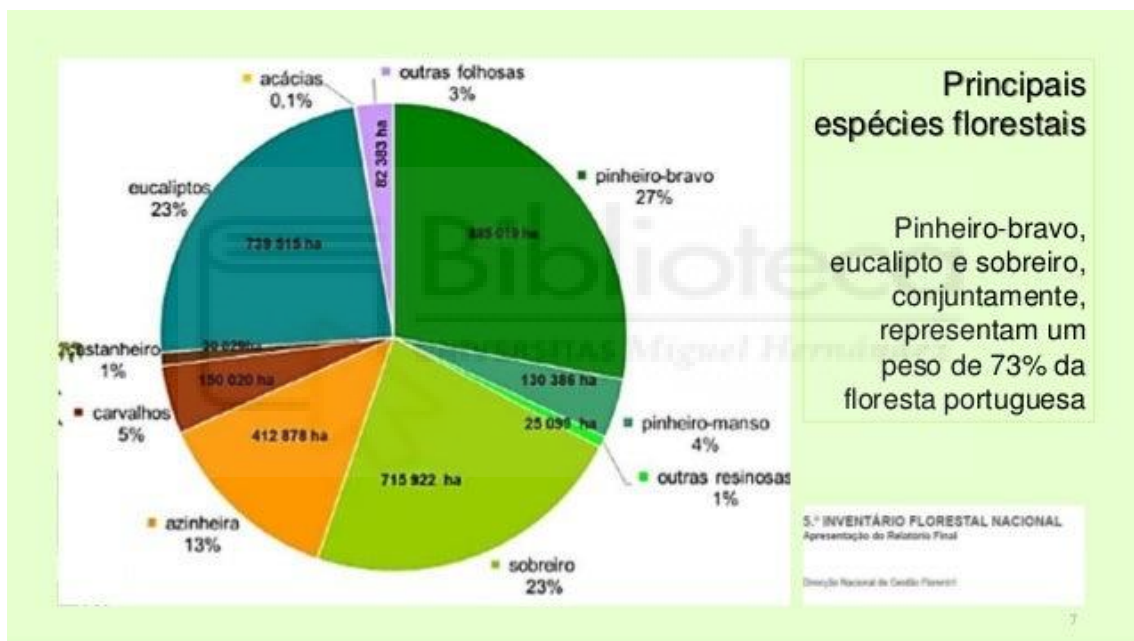


Figura 5: Representación gráfica de las principales especies forestales en Portugal en el año 2015.

Tras el incendio forestal, se llevaron a cabo dos tratamientos post-incendio muy contrastados en sus efectos para el ecosistema y el suelo, por un lado, la tala y extracción de madera quemada, y en otro sitio la aplicación de mulch compuesto de astillas de madera de la propia madera quemada en el incendio. El que los dos manejos se llevaran a cabo en el mismo

incendio nos permitirá comparar los efectos en el suelo seis años después del incendio. Por tanto, los objetivos de este trabajo son:

1. Analizar las propiedades edáficas del suelo relacionadas con su fertilidad, como son el contenido en carbono orgánico, el nitrógeno y el fósforo, en los suelos en el que se ha llevado a cabo la tala y saca de madera y en los que se ha aplicado mulch, bajo musgo y sin musgo y compararlos entre sí.

2. Evaluar las propiedades biológicas de los suelos, tanto la respiración edáfica basal y biomasa microbiana, en los suelos en los que se han hecho los distintos tratamientos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, en suelos con o sin musgo.

3. Evaluar la idoneidad de los manejos aplicados tras incendio en la conservación del suelo a seis años después del incendio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

3.1.1. Ubicación de la zona afectada

Este estudio se llevó a cabo en el área quemada de Vale de Colmeias ubicada en el municipio Miranda do Corvo del Distrito de Coímbra en centro-norte de Portugal (40°10'0" N y 8°19'60" W). La zona se encuentra a una altitud de 122 m.s.n.m. El lugar de la plantación seleccionada para el estudio presenta una pendiente empinada (27°) y se encuentra orientada al ENE.

El incendio forestal tuvo lugar en agosto de 2015 y afectó a una superficie total de 715 ha, en su mayoría ejemplares en plantaciones de *Eucalyptus Globulus Labill.* El incendio tuvo consideración de severidad moderada atendiendo al consumo de ramas y hojarasca, y el color oscuro de la ceniza y suelo mineral.

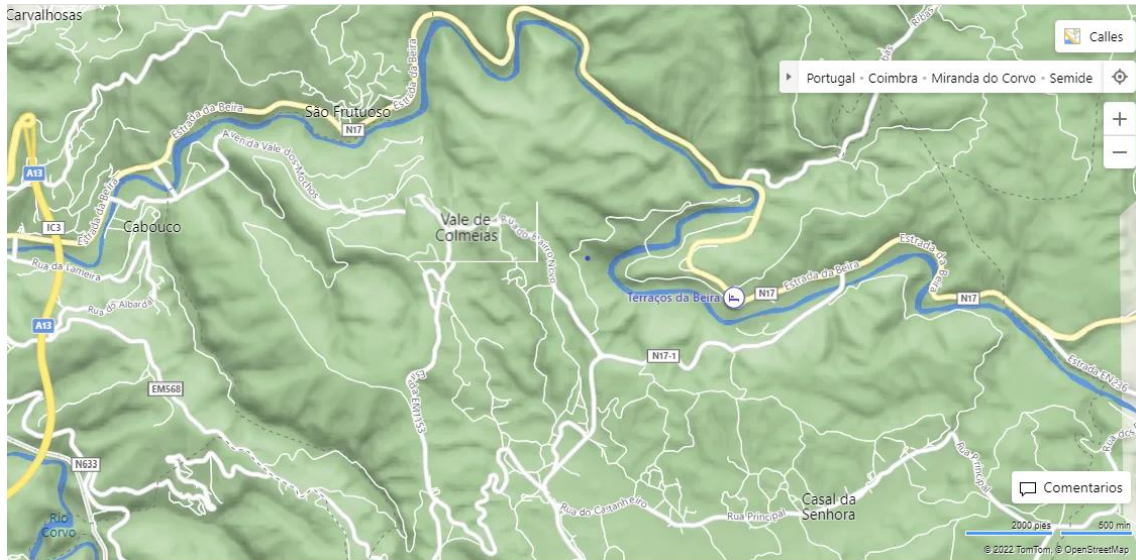


Figura 6. Mapa de Vale de Colmeias en el municipio de Miranda do Corvo.

3.1.2. Clima

El clima de la zona es mediterráneo con influencia oceánica y se puede clasificar como mesotérmico húmedo (Csb, según la clasificación de Köppen), con veranos secos y cálidos. La temperatura media anual gira en torno a 12 °C y con una precipitación media anual de 851 mm.

MESES	TEMP. MEDIA (°C)	TEMP MIN. (°C)	TEMP.MÁX. (°C)	PRECIPITACIONES (mm)
Enero	10,2	6,1	14,3	129
Febrero	11,1	6,7	15,6	124
Marzo	13,5	9	18	76
Abril	15,1	10,2	20,1	82
Mayo	16,8	11,9	21,8	70
Junio	20,1	14,5	25,8	41
Julio	21,8	14,5	28	10
Agosto	22,3	15,8	28,9	11
Septiembre	20,9	15	26,8	45
Octubre	17,6	12,6	22,7	96
Noviembre	13,3	9,3	17,4	122
Diciembre	10,6	6,8	14,5	116

Tabla 1. Climograma de la zona de Coimbra (Portugal)

3.1.3. Vegetación

La vegetación en el centro-norte de Portugal, concretamente en el Vale de Colmeias, se caracteriza por plantaciones comerciales de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) debido a que su madera tiene gran valor comercial por ser compacta y poseer pocos nudos. Por otra parte, se encuentra plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*) para aprovechamientos madereros. Para los dos tipos de bosques principales, cabe aclarar que ambas plantaciones son de origen antrópico y propensos a incendios, utilizándose métodos de aprovechamiento maderero como la tala de salvamento o tala rasa, es decir, la extracción de los recursos madereros quemados.

Seis años después del incendio, sobre el suelo se extiende, formando parches dando heterogeneidad en el suelo, una biocostra dominada por musgo.



Figura 7. Bosque de *Eucalyptus globulus Labill* del Vale de Colmeias en el municipio de Miranda do Corvo.

3.1.4. Suelos y geología.

Los suelos del área de estudio se clasificaron como una asociación de *Epileptic Umbrisol* y Cábico Umbrisol (WRB, 2014), desarrollados sobre esquistos pre-Ordovícicos parcialmente

erosionados del Macizo Hespérico. Los suelos tienen un espesor promedio de 30 cm y textura franca, con pH que oscilan entre 4.6 y 4.8.

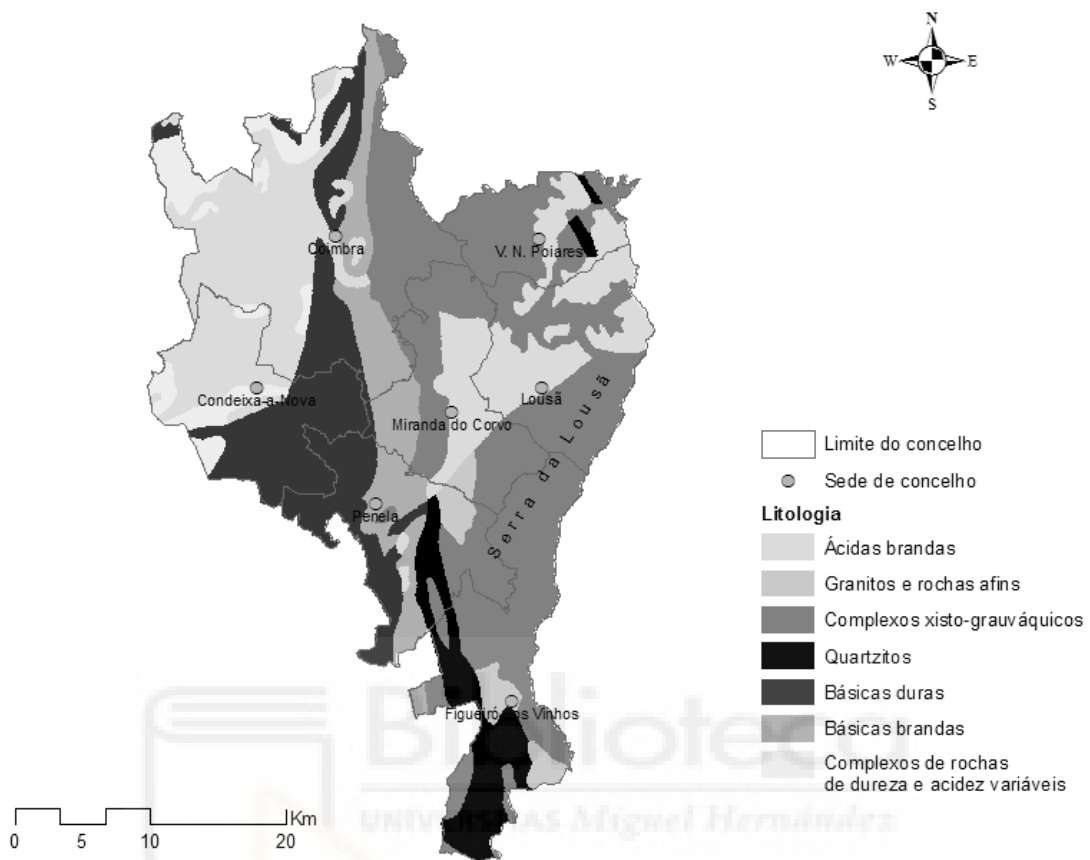


Figura 8. Suelos y geología de la zona de estudio donde se produjo el incendio.

3.1.5. Manejos post-incendio, diseño experimental y muestreo.

Después del incendio, en septiembre de 2015, se efectuaron dos manejos forestales en el área afectada, pero en dos zonas separadas. Los manejos consistieron en dos técnicas muy contrastadas, un factor importante que determinará la capacidad del suelo para recuperarse de la degradación:

- Tala y saca de madera, o tala de salvamento. Se realizó con maquinaria pesada, un tractor con dos pasadas produciendo pistas por donde se produjo las pasadas. El manejo acabó resultando en una erosión moderada del terreno. El tratamiento se llamó “saca” en el estudio, y

se estableció una zona control donde se dejó sin actuación, árboles quemados sin talar (“control saca”).



Figura 9. Zona de estudio de tala y saca de madera. a) Control sin saca de madera. B) efectos de una pasada de la maquinaria en la saca de madera. C) efectos de las pasadas de la maquinaria en la saca de madera.

- Aplicación de mulch formado del astillado de madera de los propios residuos de eucalipto generados después del incendio, picados en las operaciones de tala. La aplicación se realizó de forma homogénea en el suelo, en dos ratios distintos: ratio standard de 8.0 Mg ha^{-1} , una dosis considerada efectiva para parar en la erosión determinada previamente en diversos trabajos de la región (Keizer et al., 2018), y ratio bajo, de 2.6 Mg ha^{-1} , dosis efectiva bajo condiciones de laboratorio bajo lluvia simulada (Prats et al., 2017). Además de los tratamientos, se añadió una zona control sin aplicación de mulch (“control mulch”).



Figura 10. Zona de estudio donde se ha aplicado mulch. En la parte izquierda se observa la parcela con aplicación estándar de mulch y en la derecha la parcela con dosis baja de mulch.

El muestreo se llevó a cabo 6 años después del incendio, en julio de 2021. En cada uno de los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, se tomaron 10 muestras de suelo para cada tratamiento (5 tratamientos de estudio: “control saca”, “saca”, “control mulch”, “mulch dosis baja”, “mulch dosis standard”, n total =50), 5 bajo suelos con biocostra de musgo y 5 bajo suelo desnudo para estudiar el efecto el suelo del crecimiento de musgo en la recuperación del suelo. Las muestras se tomaron en los primeros 2.5 cm de suelo.

3.2. Análisis y laboratorio

3.2.1. Carbono orgánico oxidable

La determinación de materia orgánica del suelo se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black (Nelson and Sommers, 1983). Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Después de un cierto tiempo de espera, la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe-3 y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso amónico (Sal de Mohr).



Figura 11. Valoración con Sal de Mohr en la determinación de carbono orgánico.

3.2.2. Nitrógeno.

El contenido en nitrógeno se determina por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982). El método Kjeldahl consta de tres etapas:

1. Digestión: El objetivo del procedimiento de digestión es romper todos los enlaces de nitrógeno de la muestra y convertir todo el nitrógeno unido orgánicamente en iones amonio (NH_4^+).

2. Destilación: Durante el proceso de destilación los iones amonio (NH_4^+) se transforman en amoniaco (NH_3) mediante la adición de un álcali (NaOH). El amoniaco (NH_3) es arrastrado al vaso receptor por medio de una corriente de vapor de agua. El vaso receptor para el destilado se llena con una solución absorbente para capturar el gas amoniaco disuelto.

3. Valoración: El amoniaco y el ácido bórico están en relación 1:1 con el amonio y el ion borato. Con ayuda de HCl valoraremos la cantidad de ion borato obtenida, que al estar en esta relación será el mismo que Nitrógeno.



Figura 12. Digestión del nitrógeno mediante el método del Nitrógeno Kjeldahl.

3.2.3. Fosforo

El contenido en fósforo asimilable se analiza siguiendo el método de Olsen (Soil Conservation Service, 1972). Se realiza una extracción del fósforo con la disolución extractora Olsen y a continuación se toman las medidas con el espectrofotómetro UV.

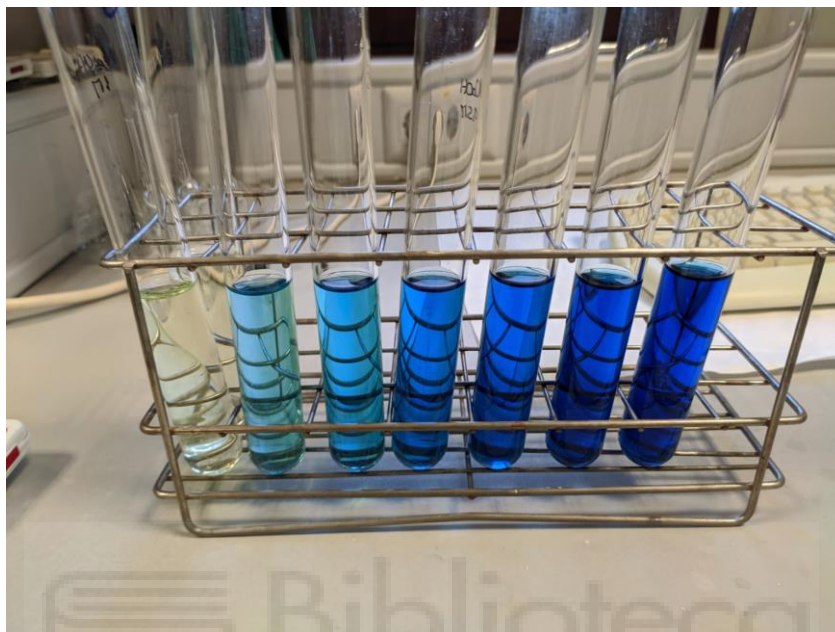


Figura 13. Muestras de las disoluciones del fosforo.

3.2.4. Respiración edáfica basal y carbono de la biomasa

La respiración edáfica basal se midió en muestra fresca de suelo durante 24 horas en un respirómetro de impedancia (modelo μ -Trac 4200 SY-LAB). Este test mide la cantidad de CO_2 liberada por unidad de masa de suelo y por unidad de tiempo, para 4g de suelo humectado al 60% de su capacidad máxima de retención hídrica. La tasa de respiración se mide de manera indirecta en base a la medida de la impedancia de una solución de cloruro potásico al 2% que va captando el CO_2 producido por la actividad biológica de los organismos del suelo.

La medida de biomasa microbiana se realizó también en respirómetro de impedancia en base a la cantidad de CO_2 liberada por unidad de masa de suelo, para 4g de suelo humectado al 60% de su capacidad máxima de retención hídrica, en este caso mediante respiración inducida mediante sustrato, glucosa en este caso, de acuerdo con el método propuesto por Anderson y Domsch (1978).

3.2.5. Análisis estadístico.

Se comprobó la normalidad de los valores con el test de normalidad Shapiro-Wilks. Para cada variable, se realizó una ANOVA de 3 vías para el estudio de los distintos factores de estudio: el tipo de manejo (tala y saca y mulch), tratamiento (“control saca”, “saca”, “control mulch”, “mulch dosis baja”, “mulch dosis standard”), y musgo (“no musgo”, “musgo”), y por último la interacción entre los tres factores de estudio. Para cada tratamiento, se estudió las diferencias significativas entre grupos realizando un test post-hoc de Tuckey ($p < 0,05$) asumiendo varianzas iguales. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa SPSS versión 24.0 (IBM SPSS statistics 2016).

4. RESULTADOS

4.1. Carbono orgánico del suelo

Figura 14. Carbono orgánico del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p -valor < 0.05).

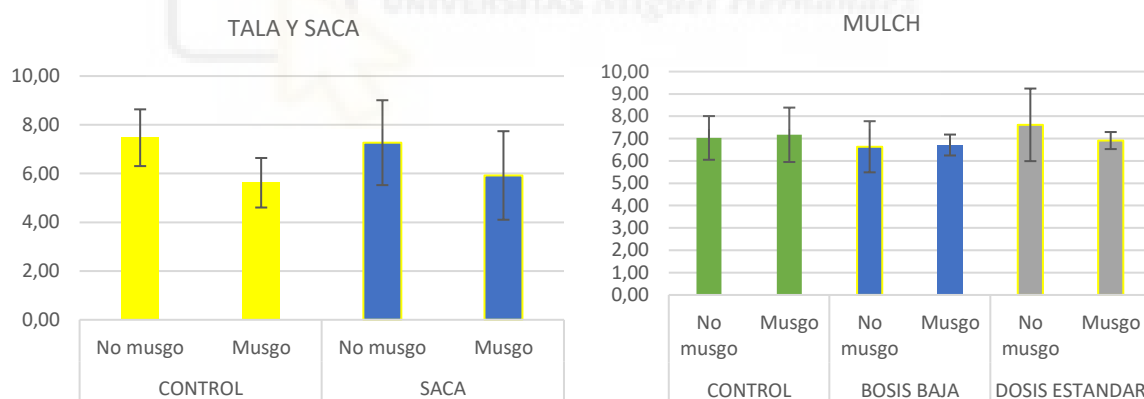


Tabla 2. Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el carbono orgánico del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = < 0.001 ; ** = < 0.01 ; * = < 0.05 .

<i>ANOVA 3-vías Carbono Orgánico</i>	<i>p-valor</i>
Manejo	0,224
Tratamientos	0,753
Musgo	0,043*
Manejo:Trat:Musgo	0,316

En los datos obtenidos podemos observar como en la tala y saca de madera, tanto en el control como en el propio manejo, hay una tendencia a ser mayor el carbono orgánico en los suelos que no presentan musgo, que en los que lo tienen en superficie. Esto no ocurre en la aplicación de mulch, que no se aprecia una gran diferencia en los suelos que contienen musgo, que en los que no. Salvo en la dosis estándar, se puede observar que en los suelos que no contienen musgo hay una tendencia de aumento de carbono orgánico que en el suelo que contiene musgo.

Tras la ANOVA de 3 vías podemos observar cómo, efectivamente, la presencia de musgo es significativa para el carbono orgánico, mientras que ni el manejo ni los distintos tratamientos son significativos.

4.2. Nitrógeno

Figura 15. Nitrógeno del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

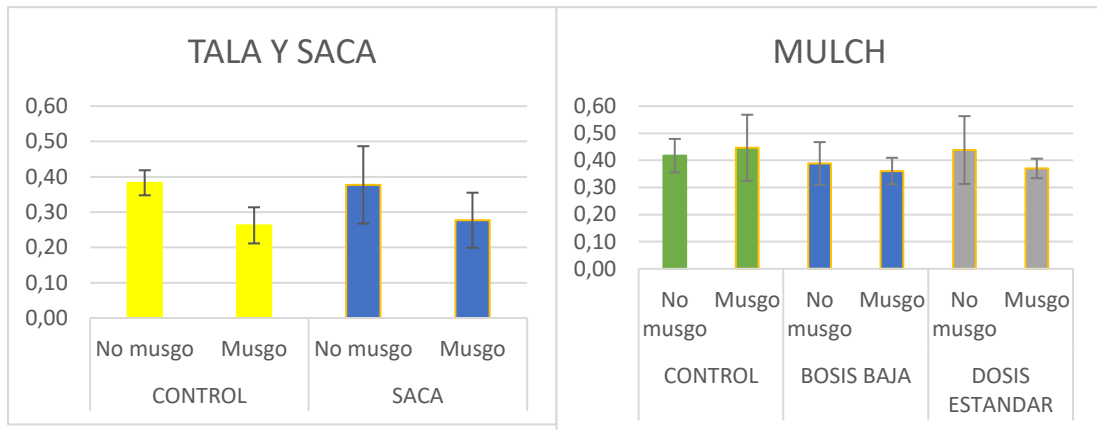


Tabla 3. Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el nitrógeno del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <math><0.001</math>; ** = <math><0.01</math>; * = <math><0.05</math>.

Anova 3 vías Nitrógeno	p-valor
Manejo	0,0017**
Tratamiento	0,436
Musgo	0,015*
Manejo:Tratamiento:Musgo	0,241

Para los datos de nitrógeno, se puede observar en el tratamiento de tala y saca de madera mayor contenido de nitrógeno en los suelos que no contienen musgo, siendo significativo más bajo el contenido en N en los controles con musgo. Por otro lado, en los suelos donde se ha aplicado mulch, se puede observar tanto en el control, como a una dosis baja, no hay mucha diferencia en el contenido del nitrógeno, en los suelos que contienen que en los que no tienen musgo. En cambio, al aplicar mulch a una dosis estándar, se puede apreciar un aumento en el contenido del nitrógeno en los suelos donde no hay musgo.

Tras el estudio de factores con la ANOVA de 3 vías, se puede observar como las diferencias entre manejos son significativas, así como lo es también la presencia de musgo para el nitrógeno de los suelos.

4.3. Fósforo disponible

Figura 15. Fosforo del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

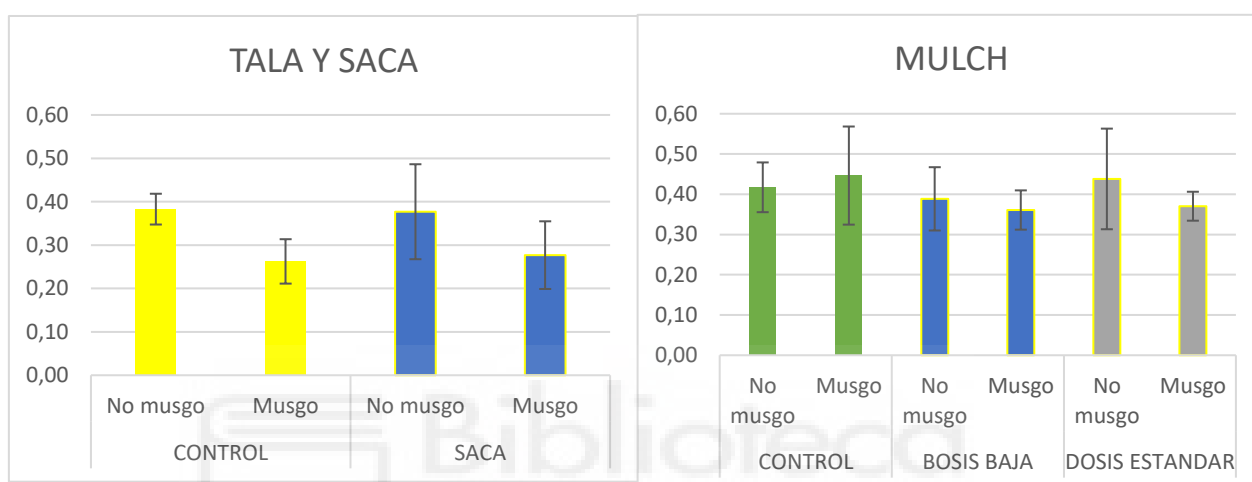


Tabla 4. Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para el fósforo del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.

Anova 3 vías Fósforo	p-valor
Manejo	<0,001***
Tratamiento	<0,001***
Musgo	0,648
Manejo:Tratamiento:Musgo	0,135

En el fósforo disponible en suelos, se puede observar un aumento significativo en los suelos en los que se ha aplicado la saca de madera, sin diferencias en cuanto a la presencia de musgo. En los suelos donde se ha aplicado el tratamiento de mulch, se puede comprobar como en el control, en los suelos con musgo, hay una tendencia de aumento de fosforo que en los suelos que no contienen musgo, esto es diferente en los suelos donde ha habido una dosis baja de mulch, que la diferencia en cantidad de fosforo en ambos suelos es insignificante. Las diferencias son más evidentes donde se ha aplicado una dosis estándar de mulch, la cantidad de fosforo es superior en los suelos donde no hay musgo que en los suelos donde hay biocostra.

Tras la aplicación de ANOVA, se puede observar cómo tanto el manejo aplicado como los tratamientos son altamente significativos, pero no en el caso de la presencia de musgo.

4.4. Respiración Edáfica basal

Figura 16. Respiración basal del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

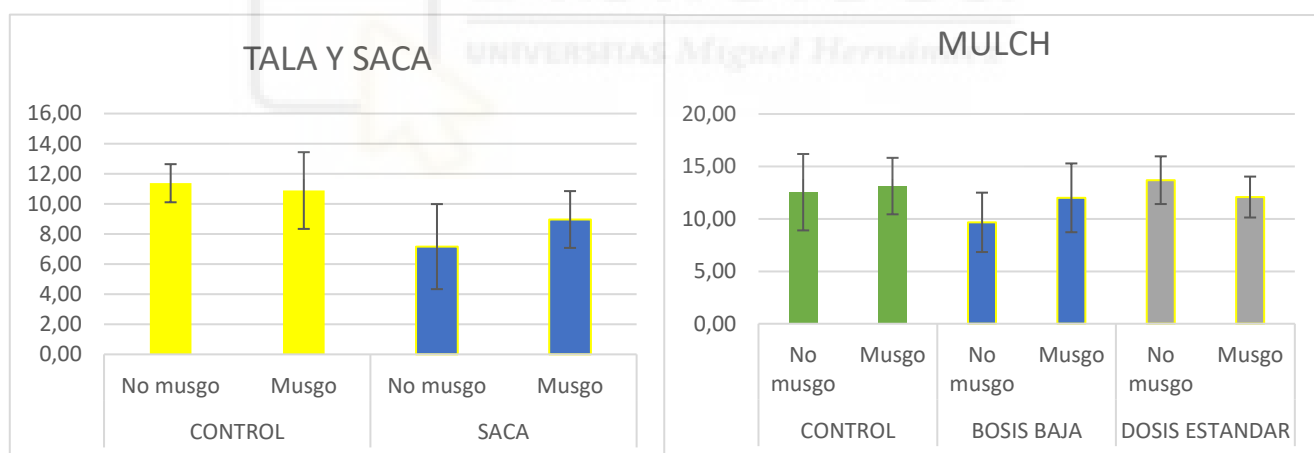


Tabla 5. Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para la respiración basal del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.

ANOVA 3-vías Respiración Basal	p-valor
Manejo	0,001**
Tratamientos	0,020*
Musgo	0,480
Manejo:Trat:Musgo	0,437

Se puede observar en los datos recopilados de la respiración basal, como en el control de tala y saca de madera hay más respiración en los suelos que no contienen musgo, a diferencia del control, en los suelos donde se ha producido una tala y saca de madera la diferencia de respiración es significativa, donde se produce un aumento de la respiración en los suelos que contienen musgo de los que no. En el control de la aplicación de mulch, la diferencia es escasa, se puede apreciar un pequeño aumento de respiración en los suelos que contienen musgo. En cambio, en los suelos donde se ha aplicado una dosis baja de mulch, se puede comprobar que hay un aumento apreciable en los suelos donde hay musgo de los que no. Por otro lado, en los suelos donde se ha utilizado la dosis estándar de mulch, la diferencia es significativa, viéndose un aumento de respiración en los suelos que no contienen musgo de los que sí.

4.5. Biomasa microbiana

Figura 17. Biomasa microbiana del suelo para los dos manejos, tala y saca de madera y aplicación de mulch, diferenciados por tratamientos y por presencia de musgo. Las letras indican diferencias significativas entre tratamientos y presencia de costra (test de Tukey, p-valor <0.05).

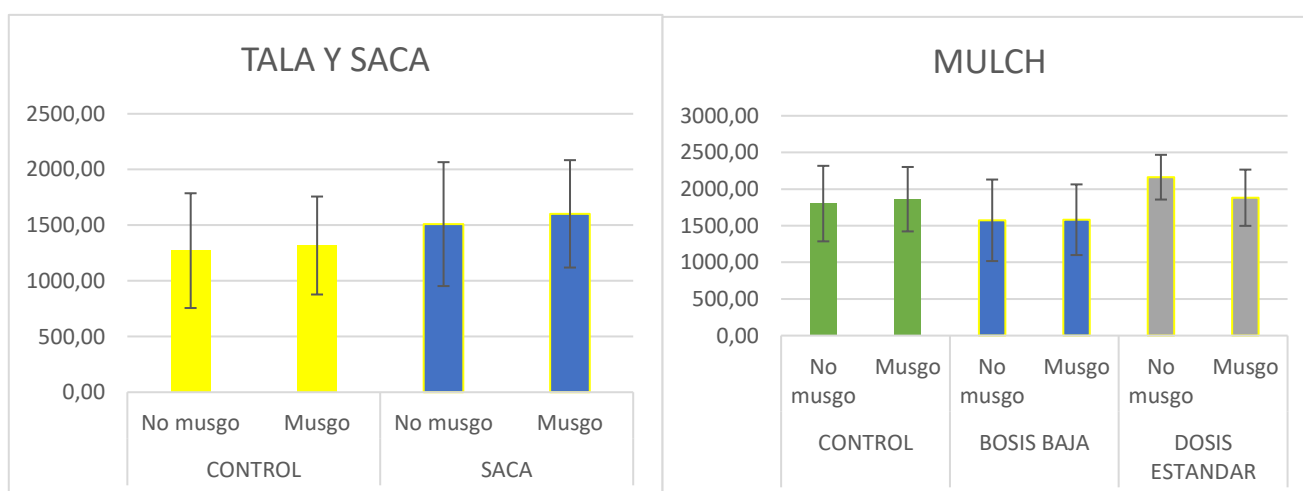


Tabla 6. Resultados (p valores) para ANOVA de 3 vías para el estudio de los factores manejo, tratamientos y presencia de musgo (y la combinación), para la biomasa microbiana del suelo. Los asteriscos marcan diferencias significativas de la siguiente forma: *** = <0.001; ** = <0.01; * = <0.05.

<i>ANOVA 3-vías Biomasa Microbiana</i>	p-valor
Manejo	0,0048**
Tratamientos	0,101
Musgo	0,907
Manejo:Trat:Musgo	0,885

En la biomasa microbiana del suelo, tanto en el control como la tala y saca de madera, podemos deducir que hay más biomasa en los suelos que contienen musgo, que en los que no. En el tratamiento con mulch, tanto en el control como en la dosis baja, con los datos obtenidos no se aprecia mucha diferencia en los suelos que contienen musgo de los que no. Esto no ocurre en la aplicación de mulch a dosis estándar, donde la diferencia es significativa, en los suelos que no contienen musgo tienen más biomasa que en los que contienen musgo.

5. DISCUSIÓN

En este trabajo se estudiaron los suelos afectados por un incendio seis años después en el que se detectó presencia de musgos y afectados por dos manejos post-incendio, el efecto de la tala y saca de madera, así como la aplicación de mulch en las propiedades del suelo, en dos ratios distintos en una plantación de eucalipto en Coimbra, Portugal.

Las propiedades biológicas y una gran cantidad de procesos físicos-químicos y mineralógicos del suelo pueden verse alteradas por los incendios forestales. Los incendios producen la calcinación de la materia orgánica del suelo produciendo inestabilidad a los ciclos biológicos (Mataix Solera, 2000). Además, el fuego causado por los incendios forestales afecta

al ciclo del nitrógeno debido a la volatilización y al consumo del nitrógeno orgánico almacenado en el humus (Mataix Solera et al., 1999). Si el incendio tiene una gravedad baja o moderada puede producir cambios permanentes en la estructura del suelo y sus propiedades.

Por ello, el manejo post incendio es un elemento importante que puede afectar profundamente la recuperación del suelo. En nuestra zona de estudio se realizaron dos manejos en dos zonas de estudio distintas bajo el mismo incendio. El primer manejo es la tala de salvamento, es el tratamiento más utilizado en Portugal, pero la problemática de este manejo, es que llega a provocar bajo ciertas circunstancias procesos de erosión (Malvar et al., 2017), provocar cambios en el ciclo de nutrientes (Pereg et al., 2018) y devastar las poblaciones microbianas del suelo (García-Carmona et al., 2021). Sin embargo, no se observó disminuciones significativas en el carbono orgánico y el nitrógeno en los suelos afectados por la saca. Esta causa podría ser justificada en la forma que se realizó el manejo, que no tuvo efectos duraderos en esta propiedad del suelo al no desencadenar procesos erosivos graves, resultados que concuerdan con Fernández y Vega (2016). Por otro lado, podemos observar un incremento en fósforo en los suelos afectados por la saca de madera. El fósforo tiende a estar disponible tras los incendios debido a la quema de la vegetación (Certini, 2005). La mayor concentración de P en suelos afectados por tala y saca de madera ha sido observado en otros trabajos, quizás debido a procesos de erosión iniciales y movimiento de suelo (García-Carmona et al., 2020).

Hay que destacar, que la madera obtenida en el manejo de tala y saca de madera contiene una gran cantidad de nutrientes que son cruciales para el correcto desarrollo de la vegetación futura (Castro et al., 2013), por lo que aplicados posteriormente en los tratamientos de mulch, aparte de ayudar a controlar la erosión, supondría un aumento en nutrientes en suelo. Podemos observar esa tendencia a mayor carbono orgánico y nitrógeno respecto al control en los suelos con mayor ratio de mulch aplicado, es decir, donde mayor concentración de nutrientes se han aplicado gracias a la madera quemada (Marañón-Jiménez et al., 2013).

En cuanto a la presencia de biocostra, no se detectó una influencia positiva de la biocostra en la recuperación de los suelos afectados por el incendio. Se determinaron valores mínimamente inferiores de carbono orgánico y N en los suelos que hay una presencia de briofitos que en aquellos que no se observa su presencia, especialmente en los suelos con saca. Este hecho va en contra de lo esperado, ya que las biocostras son productores primarios que influyen en el ciclo de los nutrientes aumentando su concentración en los suelos debajo de su desarrollo (Belnap y Lange, 2013).

Respecto a la actividad microbiana, una menor respiración edáfica basal se observó en los suelos donde más carbono orgánico se concentró. Sin embargo, los valores más bajos se encuentran en los suelos afectados por la saca, indicativo de que los suelos han sufrido un proceso degradativo aun presente seis años después (García-Orenes et al., 2017). Se observó sin embargo una mayor actividad en los suelos bajo biocostra en algunos suelos. Este resultado respondería lo encontrado en García-Carmona et al. (2022) en el que se observa que debajo de las biocostras se concentra una mayor actividad de microorganismos favorecidos por mejores condiciones microclimáticas, como es un incremento en humedad.

Por otro lado, el acolchado minimiza los riesgos de erosión post-incendio proporcionando una capa superficial a los suelos, antes de la aparición de la vegetación vascular (Girona-García et al., 2021). En el suelo se acumula una gran cantidad de CO₂, autores como Bautista (2009) tuvieron como resultados, un aumento de la vegetación total en las parcelas con acolchado, sin embargo, con el tiempo, la vegetación vascular tiende a aumentar mientras que la vegetación briofita tiende a mantenerse o disminuir, posiblemente por la competencia que produce la vegetación vascular sobre la humedad, la luz y el sustrato (Esposito et al., 1999; García-Carmona et al., 2020).

6. CONCLUSIONES Y PROYECCIONES FUTURAS.

Desde el análisis y el estudio de los resultados obtenidos en la presente investigación, se ha logrado sintetizar todas las ideas expuestas a través de las siguientes conclusiones:

- I. En cuanto a los valores del **carbono orgánico, nitrógeno y fósforo**, los resultados muestran que, en ambos tratamientos, se produce un aumento de carbono orgánico y de los nutrientes nitrógeno y fósforo en los suelos en los que no se detecta presencia de biocostra.
- II. Hay un aumento del valor de la **REB**, en los suelos donde hay presencia de biocostra en el tratamiento de tala y saca de madera.
- III. Se observa un aumento de la **biomasa microbiana** en los suelos que hay presencia de biocostra en el tratamiento de tala y saca de madera.
- IV. En el caso del control del tratamiento de acolchado, hay un aumento en los valores **de todas las propiedades edáficas estudiadas**, en los suelos donde hay presencia de biocostra.

V. Podemos decir que el tratamiento postincendio, que consistió en la tala y saca de madera no fue muy agresivo, ya que los parámetros estudiados se han recuperado bien. Sería necesario un estudio más exhaustivo para comprobar si la biocostra del suelo tiene un papel relevante en las propiedades edáficas del suelo.

Respecto a las proyecciones futuras, se ha podido reconocer la falta de estudios previos asociados con este estudio. Existe una amplia información acerca de los tratamientos post-incendios respecto a los múltiples efectos que produce frente a la erosión del suelo, no obstante, cabe destacar la carencia de información relacionado con los biofritos y los efectos que producen estos después de un incendio forestal en las propiedades edáficas, sería interesante un estudio más detallado sobre esta relación.

Por este motivo, algunas proyecciones futuras o nuevas líneas de investigación podrían ser, entre otras:

- El impacto de los biofritos en las propiedades edáficas después de un incendio forestal, debido a la complejidad del estudio, ya que las biocostras varían en función del clima o topografía del lugar.

-La relación de los tratamientos post-incendios y las biocostras del suelo después de producirse un incendio forestal.

- El impacto de los tratamientos como la tala y saca de madera y la aplicación de mulch tras un incendio forestal en las propiedades edáficas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, J. P., & Domsch, K. H. (1978). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil biology and biochemistry*, 10(3), 215-221.

Arriols, E. (2022, 1 marzo). Qué son los incendios forestales y cómo se producen. *ecologiaverde.com*. <https://www.ecologiaverde.com/que-son-los-incendios-forestales-y-como-se-producen-1703.html>

- Bautista, S., Bellot, J. & Vallejo, V.R. (1996): Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem, *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10:3, 235-242.
- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la asociación de Geógrafos Españoles*.
- Caon, L., Vallejo, V. R., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.
- Castro, J., Leverkus, A.B., Marañón-Jiménez, S., Serrano-Ortiz, P., SánchezCañete, 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
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Román, J. R., & Cantón, Y. (2017). Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. *Catena*, 148, 117-125.
- Deutsche Welle (www.dw.com). (2020, 24 septiembre). *Incendios forestales: el eterno problema de Portugal*. DW.COM. <https://www.dw.com/es/incendios-forestales-el-eterno-problema-de-portugal/a-55041677>
- Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., Steinkamp, J., Büdel, B., Andreae, M. O., & Pöschl, U. (2012). Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7), 459-462.
- Esposito, A., Mazzoleni, S., & Strumia, S. (1999). Post-fire bryophyte dynamics in Mediterranean vegetation. *Journal of Vegetation Science*, 10(2), 261-268.
- García-Carmona, M., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Roldán, A., Pereg, L., & Caravaca, F. (2021). Salvage logging alters microbial community structure and functioning after a wildfire in a Mediterranean forest. *Applied Soil Ecology*, 168, 104130.

- García-Carmona, M., Arcenegui, V., García-Orenes, F., & Mataix-Solera, J. (2020). The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. *Journal of environmental management*, 262, 110287.
- García-Orenes, F., Arcenegui, V., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Moltó, J., Jara-Navarro, A. B., & Torres, M. P. (2017). Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: a two year monitoring research. *Science of the Total Environment*, 586, 1057-1065.
- Girona-García, A., Vieira, D. C., Silva, J., Fernández, C., Robichaud, P. R., & Keizer, J. J. (2021). Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Science Reviews*, 217, 103611
- J. Belnap, O.L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, vol. 150, Springer Science & Business Media (2013).
- J.M. Bremner, C.S. Mulvaney. Nitrogen total. A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Madison (1982), pp. 595-624.
- Jovens Repórteres para o Ambiente. (2017, 31 mayo). *Gráfico eucaliptos*. <https://jra.abae.pt/plataforma/artigo/o-eucalipto-no-oeste/grafico-eucaliptos/>
- Keizer, J. J., Silva, F. C., Vieira, D. C., González-Pelayo, O., Campos, I. M. A. N., Vieira, A. M. D., & Prats, S. A. (2018). The effectiveness of two contrasting mulch application rates to reduce post-fire erosion in a Portuguese eucalypt plantation. *Catena*, 169, 21-30.
- Liu, Y., Li, X., Xing, Z., Zhao, X., & Pan, Y. (2013). Responses of soil microbial biomass and community composition to biological soil crusts in the revegetated areas of the Tengger Desert. *Applied Soil Ecology*, 65, 52-59.
- Malvar, M. C., Silva, F. C., Prats, S. A., Vieira, D. C., Coelho, C. O., & Keizer, J. J. (2017). Short-term effects of post-fire salvage logging on runoff and soil erosion. *Forest ecology and management*, 400, 555-567.

- Marañón-Jiménez, S., & Castro, J. (2012). Effect of decomposing post-fire coarse woody debris on soil fertility and nutrient availability in a Mediterranean ecosystem. *Biogeochemistry*, 112(1–3), 519–535. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9744-x>
- Mataix-Solera, J. (2000). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2009). Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España, 25-53.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M., & Torres, M. P. (2009). Forest fire effects on soil microbiology. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 149-192). CRC press.
- Naredo, J. M. (2004). Evolución de la agricultura en España (1940-2000). Universidad de Granada.
- Naveh, Z. (1975). The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. *Vegetatio*, 29(3), 199-208.
- Nelson, D. A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- 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, 1079-1087.
- Pereira, V., Fitzpatrick, E.A., 1995. Cambisols and related soils in north-central Portugal: their genesis and classification. *Geoderma* 66, 185–212.
- Prats, S. A., Abrantes, J. R., Crema, I. P., Keizer, J. J., & de Lima, J. L. (2017). Runoff and soil erosion mitigation with sieved forest residue mulch strips under controlled laboratory conditions. *Forest Ecology and Management*, 396, 102-112.

- R. (2003, 1 diciembre). *Incendios forestales en Portugal*. *Ecologistas en Acción*.
<https://www.ecologistasenaccion.org/7689/incendios-forestales-en-portugal/>.
- Robichaud, P. R. (2000). Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments (No. 63). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Wagenbrenner, J. W., Ashmun, L. E., & Brown, R. E. (2013). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation: Part I: Effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena*, 105, 75-92.
- Silva, F. C., Vieira, D. C., van der Spek, E., & Keizer, J. J. (2019). Effect of moss crusts on mitigation of post-fire soil erosion. *Ecological Engineering*, 128, 9-17.
- Soil Conservation Service, U. S. D. A. (1972). Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. *Soil Surv. Invest. Rep. 1*.
- World Reference Base for Soil Resources. (2014). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Xiao, B., Hu, K., Ren, T., & Li, B. (2016). Moss-dominated biological soil crusts significantly influence soil moisture and temperature regimes in semiarid ecosystems. *Geoderma*, 263, 35-46.