

**Estudio de las propiedades químicas y biológicas de un suelo tras
la aplicación de compost como manejo post-incendio.
Caso de estudio mega-incendio de Chile de 2017**

Carmen Ocáriz Llopis

Tutoras: Fuensanta García Orenes, Minerva García Carmona.



Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente.

Trabajo final de Grado en Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias Experimentales

Universidad Miguel Hernández

Elche, Curso 2019-2020.



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 1 |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Problemática de los incendios forestales..... | 2 |
| 1.2. Incendios en Chile | 3 |
| 1.3. Utilización de residuos orgánicos para la recuperación del suelo. | 4 |
| 2. Justificación y antecedentes. | 6 |
| 3. Objetivos | 9 |
| 4. Material y métodos | 10 |
| 4.1. Zona de estudio..... | 10 |
| 4.1.2. Vegetación..... | 10 |
| 4.1.3. Clima..... | 11 |
| 4.2. Manejo post incendio..... | 11 |
| 4.3. Diseño experimental. | 13 |
| 4.4. Análisis en el laboratorio..... | 14 |
| 4.4.1. Carbono Orgánico oxidable..... | 14 |
| 4.4.2. Nitrógeno | 14 |
| 4.4.3. Fósforo | 15 |
| 4.4.5. Actividades enzimáticas: | 15 |
| 4.5. Análisis estadístico | 17 |
| 5. Resultados..... | 18 |
| 5.1. Efectos de los tratamientos en los suelos..... | 18 |
| 5.1.1. Propiedades químicas | 18 |
| 5.1.2. Propiedades microbiológicas | 19 |
| 5.2. Relación entre propiedades químicas y microbiológicas del suelo. | 23 |
| 5.3. Respuesta de los tratamientos en el suelo | 24 |
| 6. Discusión | 24 |
| 7. Conclusión y proyecciones futuras..... | 28 |
| 8. Referencia bibliográfica..... | 30 |

RESUMEN

Los incendios forestales en la actualidad se están dando de una forma más recurrente y devastadora, por lo que en muchos casos se lleva a cabo una actuación post-incendio para minimizar los daños en las propiedades edáficas. La materia orgánica es esencial para las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo por lo que en muchos casos se lleva a la utilización de enmiendas orgánicas para mejorar la calidad de éstos tras el incendio. En este estudio hemos analizado las principales propiedades químicas y biológicas del suelo. Comparando un suelo incendiado tratado con compost vegetal (CPST), con un suelo de referencia (SV), un suelo quemado sin tratamiento (Q) y un suelo control en el que hemos plantado y cubierto con mulch (C). En general, se ha obtenido una mejora en las propiedades químicas del suelo tratado CPST en comparación con el Q. Hemos obtenido una diferencia significativa de aumento en las tres propiedades químicas observadas (carbono orgánico, fósforo y nitrógeno), siendo la cantidad de éstos superior que incluso en el SV. La adición de compost ha incrementado la actividad microbiológica del suelo, medida con la respiración basal del suelo, mejora que no se ha podido observar en las otras propiedades microbiológicas. Podemos suponer que estas propiedades microbiológicas se verán incrementadas en un futuro asociada a la mejora en las propiedades químicas. Por lo que concluimos que la aplicación del compost vegetal puede ayudar a la recuperación de un suelo tras el paso de un incendio.

Palabras clave: Incendios forestales, post-incendio, enmienda orgánica, propiedades edáficas, calidad.

ABSTRACT

Forest fires are currently occurring in a more recurrent and devastating way, so in many cases a post-fire action is carried out to minimize damage to edaphic properties. Organic matter is essential for the physical, chemical and biological properties of the soil, which in many cases leads to the use of organic amendments to improve their quality after the fire. In this study we have analyzed the main chemical and biological properties of the soil. Comparing a burning ground treated with compost (CPST), with a reference soil (SV), a burnt soil without treatment (Q) and a control soil in which we have planted and covered with mulch (C). In general, an improvement in the chemical properties of the CPST treated soil has been obtained compared to the Q. We have obtained a significant difference in the increase in the three chemical properties observed (organic carbon, phosphorus and nitrogen), the amount of these being higher than even in the SV. The addition of compost has increased the microbiological activity of the soil, measured with the basal respiration of the soil, an improvement that has not been observed in the other microbiological properties. We can assume that these microbiological properties will be increased in the future associated with the improvement in chemical properties. So we conclude that the application of vegetable compost can help the recovery of a soil after the passage of a fire.

Key words: Forest fire, post-fire, organic matter, edaphic properties, quality.

1. Introducción

1.1. Problemática de los incendios forestales.

El término “incendios forestales” se refiere a los incendios no controlados (sean de origen natural o antrópico) que ocurren en los ecosistemas y que se propagan por la vegetación (Pausas, 2012). Los incendios forestales son un proceso natural y sostenible en los ecosistemas. El problema con ellos surge en un mundo dinámico y cambiante. Cambios socioeconómicos, de gestión y uso del territorio, cambios en la densidad de población y modificaciones en el clima, afectan y cambian el régimen (la frecuencia, la intensidad, la estacionalidad, etc.) de los incendios (Pausas, 2012).

La alteración del régimen natural de los incendios constituye un serio problema medioambiental, no solo por la destrucción de la vegetación, sino también por la potencial degradación que puede producirse en los suelos debido a los cambios en sus propiedades (Hernández et al., 2000). Los efectos del fuego sobre la vegetación, fauna, características físico-químicas del suelo y de su componente biológico, dependen de factores intrínsecos que vienen definidos por las características del incendio (frecuencia, intensidad, tamaño y forma del incendio, y época) y de otros propios de las condiciones físicas del medio y de la vegetación afectada (clima, geomorfología, topografía, suelos, composición florística y fenología) (Kozłowski, 2012). Una incidencia reiterada de incendios puede ocasionar graves problemas ambientales, sobre todo en aquellos ecosistemas representados por biotopos sensibles a la erosión y lixiviación de nutrientes, así como sobre aquellos que presentan una vegetación o fauna característica o particular. Así mismo, el fuego puede consumir parte o todo el material vegetal, así como la materia orgánica contenida en las capas superiores del suelo. Los nutrientes contenidos en la materia orgánica además se hacen más volatilizables y se pierden con facilidad. Algunos de los nutrientes solubles depositados en la ceniza, si no son absorbidos inmediatamente por las plantas, pueden perderse debido a la erosión (DeBano y Conrad, 1978) o lixiviarse a las aguas subterráneas (Pritchett y Fisher, 1987), con lo que se puede llegar a perder todo el material vegetal, la materia orgánica y los nutrientes contenidos en el suelo, dejando a su paso un suelo inerte.

El fuego puede afectar diferentes propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo como pueden ser la repelencia al agua, su estructura, el pH, el color, la temperatura, la composición de los minerales, cantidad de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes (Certini, 2005). También se verán afectadas la cantidad y la actividad de los microorganismos (García-Orenes et al., 2017).

La pérdida del potencial biótico es uno de los impactos más importante en los incendios forestales. La desaparición de la vegetación da lugar a alteraciones en la biodiversidad (Kozlowski, 2012), puede llevar a la transformación del comportamiento hidrológico de las cuencas (Onodera y van Stan, 2011), y tener impactos sobre los paisajes (biomasa) asociados (van Wagendonk et al., 2004). A corto plazo, buena parte de estos efectos son difíciles de corregir; sin embargo, algunos se pueden subsanar mediante técnicas de restauración de la vegetación (Vallejo et al., 2012), y de restauración paisajística e hidrológica (Madsen et al., 2012).

1.2. Incendios en Chile

En Chile, el fuego, de manera natural o artificial (mediante quemas controladas), ha contribuido a la modificación permanente de formaciones vegetales y ecosistemas asociados, especialmente en los últimos 150 años (Castillo, 2006). Aun cuando el país ha presentado importantes avances en materia de prevención e investigación en manejo del fuego, continúa la amenaza constante de nuevos y graves incendios en la vegetación nativa, siendo muy complejos en su propagación y control. Existen varios factores que pueden explicar las consecuencias de los incendios forestales en Chile, la fragmentación de paisajes (debido en gran parte a la construcción y plantación intensiva), el impacto del turismo, el aumento de la conectividad, de la intencionalidad en los de incendios y el aumento del peligro por la prolongada sequía que ha afectado a Chile Centro-Sur en los últimos años, lo que ha provocado que el peligro sea aún mayor (Castillo et al., 2014).

Por otra parte, la acumulación de biomasa y combustible muerto en los bosques naturales y plantaciones, sumado a un ambiente físico y social que favorecen la aparición de incendios forestales, da origen a fuegos de características muy especiales, las cuales se resumen a continuación: a) alta frecuencia anual, b) alta intensidad y propagación del fuego, generando incendios incontrolables; c) incremento de los incendios intencionados; d) gran ocurrencia de focos satélites; e) alta frecuencia de incendios en el mismo sitio, en un periodo menor a 12 años, f) interfaz urbano-rural con alta ocurrencia de incendios; y g) gran impacto económico, social y ambiental (Peña-Fernández y Valenzuela-Palma, 2008).

Las plantaciones forestales acumulan una importante carga de combustible en un periodo de 8 a 12 años que como hemos comentado, interaccionan con un constante incremento del número de incendios, lo que crea una alta susceptibilidad de las plantaciones a ser afectadas por fuegos con características catastróficas. En dichas condiciones, cualquier incendio que ocurra será de alta intensidad, originándose lo que se conoce como una tormenta de fuego, la cual crea su

propio ambiente de temperatura, humedad relativa y vientos. Formándose incendios impredecibles que dificultan los métodos de combate. (Peña-Fernández y Valenzuela-Palma, 2008).

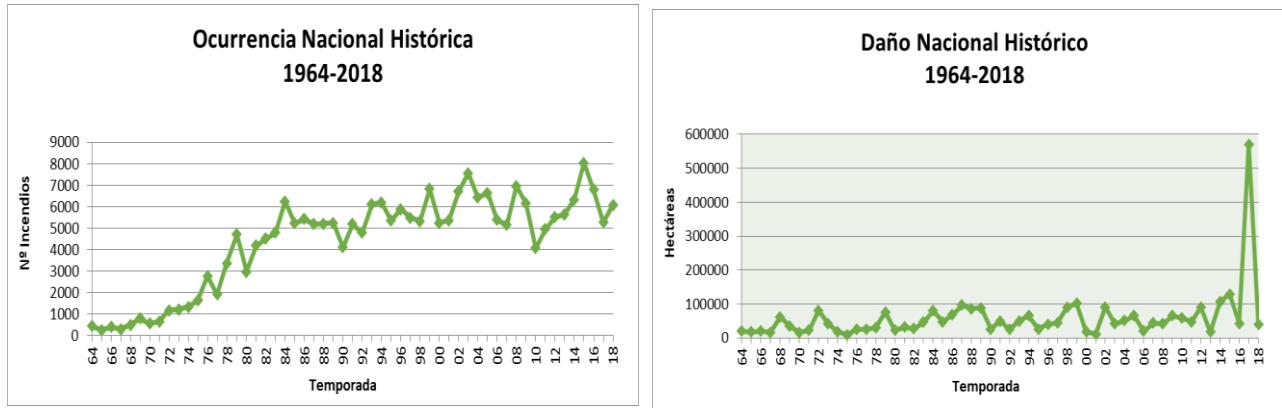


Figura 1. Ocurrencia y daño Nacional 64-2018 Chile. Fuente: CONAF

1.3. Utilización de residuos orgánicos para la recuperación del suelo.

En la sociedad chilena existe un consenso sobre la actuación ante los devastadores efectos de los grandes incendios forestales, pero ha sido de gran debate qué técnicas serían las más adecuadas para la restauración (Castro et al., 2009). Es importante tener en cuenta una intervención inmediata en zonas que sean sensibles, donde puedan acelerarse los procesos erosivos. Esto hace plantear la repoblación forestal y actuaciones silvícolas (Castro et al., 2009), cuestión que ha sido criticada por algunos autores, debido al posible efecto negativo de introducir nuevas especies o inducir procesos erosivos (Vallejo et al., 2012). Una práctica muy utilizada, tanto históricamente como en la actualidad en la restauración de suelos es la adición de enmiendas orgánicas (Guerrero et al., 2007).

Algunas de las actuaciones post incendio consisten en la adición de materiales orgánicos con alto contenido en macro y micro nutrientes que pueden ayudar a la recuperación de las características fértiles del suelo favoreciendo el desarrollo de la planta y reduciendo el tiempo necesario para alcanzar niveles adecuados para la protección del suelo (Vázquez et al., 1996). La aplicación de este tipo de materiales suele minimizar los daños causados en el suelo, estabilizando la capa de ceniza y ayudando a restablecer la vegetación y la estructura del suelo (Villar et al., 1998).

Las enmiendas como el compost pueden mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas, especialmente incrementando los nutrientes disponibles en el suelo (Carreira y Niell, 1992).

Tienen también una alta capacidad de retención del agua (Giusquiani et al., 1995) lo que induce al incremento de contenido en agua en el mismo (Guéron et al., 2013). Estas modificaciones pueden afectar positivamente a la recuperación de la cubierta vegetal, ya que influyen sobre la nutrición y crecimiento de la planta (Hernández, 2000), lo que contribuye a su vez a reducir la erosión (Guerrero et al., 2000).

La mejora en el suelo en cuestión de fertilidad dependerá de la calidad y cantidad del compost utilizado (Kowaljow y Mazzarino, 2007), lo que no quiere decir que cuanto más cantidad se añada se obtengan mejores resultados. Existen múltiples opiniones y enfoques respecto a la dosis de aplicación adecuada de enmiendas del suelo, varios estudios han demostrado que las enmiendas deben ser aplicadas a las dosis mínimas efectivas, sin presentar un riesgo de contaminación para el ecosistema (Hueso-González et al., 2018).



2. Justificación y antecedentes.

La zona centro-sur de Chile fue afectada por un megaincendio forestal que se extendió entre el 18 de enero y el 5 de febrero de 2017, principalmente en las regiones de O'Higgins, el Maule y el Biobío. Según los expertos de la Unión Europea (EU1), la inusual gravedad de estos incendios tiene como base el calentamiento global del planeta. Esta situación se convirtió en un episodio mundial, pues anterior a éste, la escala global de medición de incendios llegaba hasta la llamada "quinta generación" de incendios, el tipo más destructivo conocido. Sin embargo, el ocurrido en 2017 en Chile conocido como la "tormenta de fuego", es el primero de la llamada "sexta generación", en términos de intensidad de la línea de fuego y la velocidad de propagación (UE 2017; CONAF 2017).

Los incendios ocurridos el verano del año 2017, afectaron un total de 557.646,41 ha a nivel nacional, siendo la Región del Libertador Bernardo O'Higgins la tercera más comprometida con cerca de 105.444,13 hectáreas quemadas.

Debido al cambio climático se dieron tres condiciones para que se produzca un incendio de tales magnitudes:

1. Enero fue un mes de temperaturas récord.

Las temperaturas en general aumentaron en todo el mundo, llegando a temperaturas históricas en Chile en más de una comunidad.

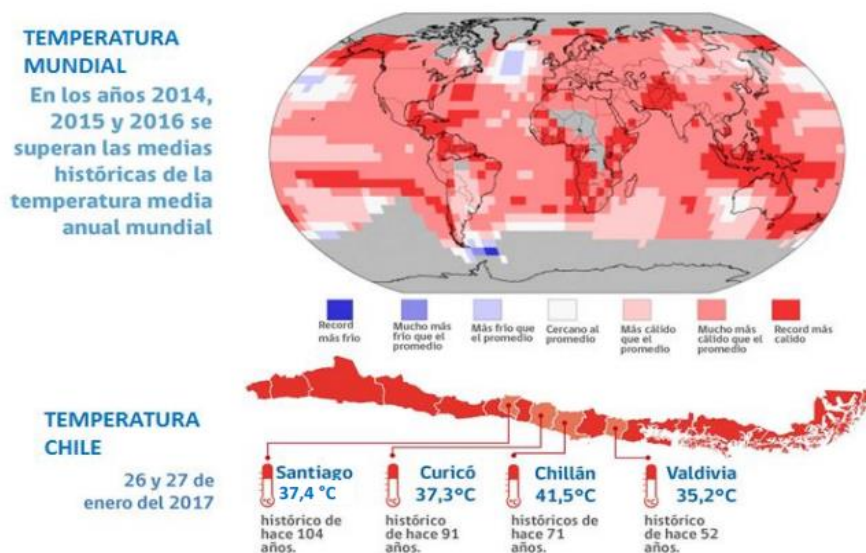


Figura 2. Mapa Mundial y de Chile del incremento en las temperaturas medias anuales. Fuente: CONAF, El gran incendio de Chile 2017 Descripción e impactos.

2. Sequía prolongada desde 2009 (severa).

Acompañando a estas altas temperaturas el país pasa por una de las peores sequías y prolongada en el tiempo. Haciendo que se incrementaran las zonas secas y que éstas fueran de mayor nivel.

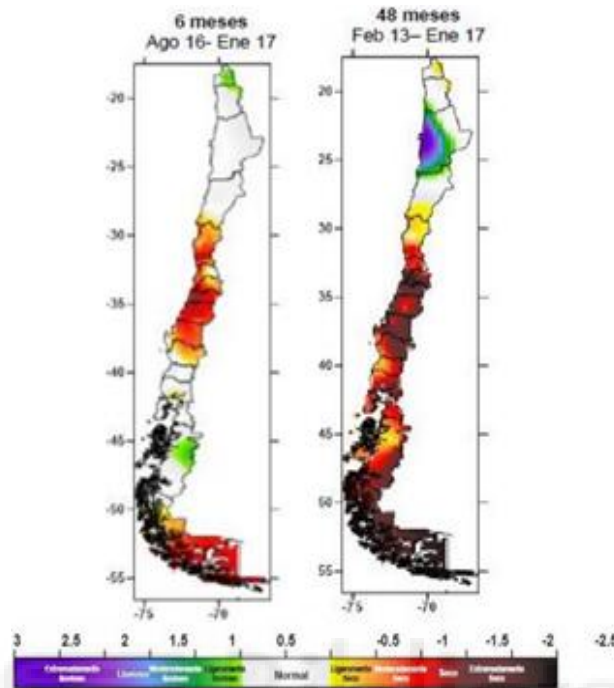


Figura 3. Mapa de Chile del incremento de las zonas con sequía y la severidad de éstas. Fuente: CONAF, El gran incendio de Chile 2017 Descripción e impactos.

3. Alto estrés hídrico en la vegetación.

Las altas temperaturas junto a la sequía prolongada hicieron que la vegetación sufriera un alto estrés hídrico. El contenido de humedad en el combustible bajaba del 5% en la mayoría de las regiones afectadas.

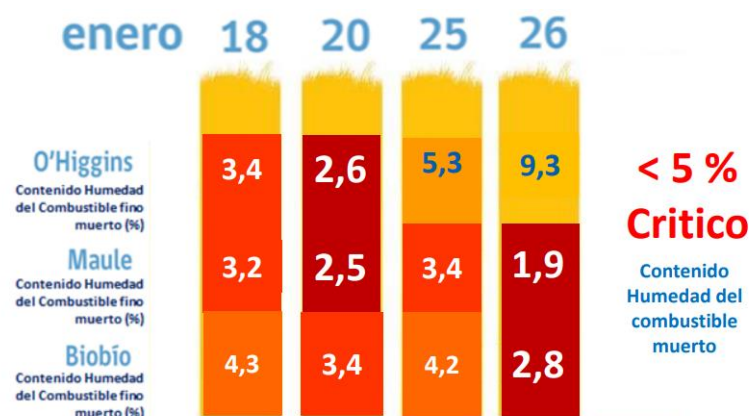


Figura 4. Gráfico con el contenido de Humedad de las tres regiones más afectadas en el incendio de 2017. Fuente: CONAF, El gran incendio de Chile 2017 Descripción e impactos.

Históricamente, los incendios en el país han ocasionado una pérdida significativa de la superficie de bosque nativo, ya que cerca del 70% de las hectáreas calcinadas anualmente corresponden a este tipo de vegetación. Esta pérdida compromete directamente la biodiversidad de estos ecosistemas, su funcionamiento y los servicios o beneficios que éstos pueden proveer a la sociedad en su conjunto. Basándose en estos antecedentes, el proyecto tuvo como eje central revelar la importancia de la recuperación de los suelos, especialmente su biodiversidad y funciones, como componente fundamental de la recuperación integral del ecosistema de bosque esclerófilo afectados por incendios. (Brito et al., 2019).

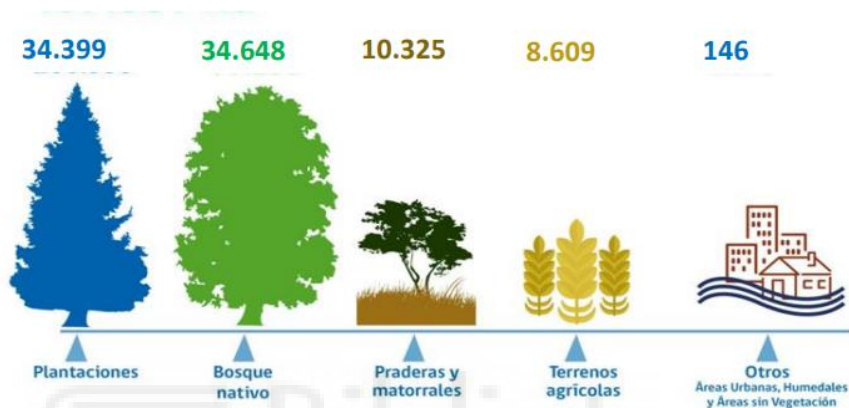


Figura 5. Hectáreas afectadas en la región de O'Higgins separadas por uso del suelo. Fuente: CONAF, El gran incendio de Chile 2017 Descripción e impactos.

Este trabajo es parte de la colaboración establecida entre el Instituto de Ciencias Agronómicas y Veterinarias de la Universidad de O'Higgins en Chile, y el Dpto. de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández, con la finalidad de evaluar los efectos que diferentes tratamientos post-incendio tienen sobre las propiedades de suelos quemados.

3. Objetivos

El objetivo de este estudio es evaluar los cambios producidos en las propiedades edáficas de un suelo quemado en un megaincendio tras la adición de una enmienda orgánica, compuesto por un compost comercial de origen vegetal, como tratamiento post-incendio.

Para ello se proponen como objetivos específicos:

- 1) Analizar las propiedades edáficas más relacionadas con la fertilidad de un suelo, como son el contenido en carbono orgánico (CO), el fósforo (P), el nitrógeno Kjeldahl (N) para evaluar su comportamiento con la gestión post-incendio realizada
- 2) Evaluar las propiedades microbiológicas como respuesta al incendio y a la adición del compost, en concreto la biomasa microbiana, la respiración edáfica basal (REB) así como las actividades enzimáticas (glucosidasa, ureasa, fosfatasa, deshidrogenasa, proteasa).



4. Material y métodos

4.1. Zona de estudio



El estudio se llevó a cabo en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, una de las dieciséis regiones en las que se divide la República de Chile. Ubicada en el centro del país. Concretamente el lugar de investigación se encuentra en la comuna de Pumanque, ($34^{\circ} 36'34.72''$ S; $71^{\circ} 42'18.95''$ W), a unos 100 km al suroeste de Rancagua (capital de la región).

Figura 6. Mapa de Chile, marcada la región del Libertador Bernardo O'Higgins. Mapa ampliado de la región estudiada, marcada la comuna de Pumanque.

Se encuentra dentro del sector de secano interior de la región, al este del cordón de la Cordillera de la Costa. Se ha seleccionado este lugar ya que fue una de las tres comunas más afectadas en la región de O'Higgins durante los incendios de verano de 2017.

Elevación de unos 130 metros sobre el nivel del mar, pendiente de 10% orientada al sur. Suelos poco profundos (40 cm de profundidad) de textura principalmente de francoarenosa a franca.

4.1.2. Vegetación

La vegetación típica del lugar es del tipo esclerófilo, con especies dominantes *Quillaja saponaria* (Quillay), *Lithraea caustica* (Litre), y *Peumus boldus* (Boldo), seguidas de las especies *Trevoa trinervis* (Tevo), *Azara serrata* (Corcolén), y *Colliguaja Odorífera* (Colliguay).

4.1.3. Clima

El clima predominante es del tipo templado mediterráneo, con variaciones por efecto de la topografía local. En la costa se presenta nuboso, mientras que, hacia el interior, debido a la sequedad, experimenta fuertes contrastes térmicos. Las precipitaciones son mayores en la costa y en la Cordillera de los Andes, debido al relieve que no permite la entrada a los vientos húmedos oceánicos.

En el litoral, que recibe la influencia oceánica predomina el clima templado nuboso, caracterizado por una mayor humedad y abundante nubosidad. En el sector de la depresión intermedia predomina un clima templado de tipo mediterráneo cálido con una estación seca de seis meses y un invierno lluvioso. A medida que se asciende por la cordillera, las temperaturas pueden descender por debajo de los cero grados en los meses de invierno. Sobre los 3.500 metros de altura se pasa al clima frío de altura con presencia de nieves eternas.

4.2. Manejo post incendio.

Los suelos se trabajaron con un motocultivador hasta los 30 cm de profundidad. A continuación, se aplicó con equipamiento manual enmiendas orgánicas con un volumen fijo de 1800 m³ de compost por ha⁻¹ de suelo.



Figura 7. Establecimiento de parcelas experimentales en abril del 2018.

- a) Preparación de suelo con motocultivador a 30 cm de profundidad
- b) Depósito e incorporación de la enmienda orgánica sobre la superficie de suelo.
- c) Protección de parcelas experimentales con mulch de paja de trigo.

Tanto en las parcelas control (suelo quemado) como en las parcelas en las que se les había tratado con la enmienda orgánica, se realiza una plantación de Boldo, Litre y Quilla de un marco de plantación de 2200 ejemplares por ha para cada especie. Estas especies varían en tamaño desde alrededor de 30 cm de altura en ejemplares de Boldo, a aproximadamente 100 cm en ejemplares de Quilla. Al finalizar el proceso se cubrieron todas las parcelas experimentales con

una capa de mulch de trigo con la finalidad de mantener la humedad y favorecer la actividad microbiana (Lupton et al 2014).

Se ha realizado el análisis del compost vegetal utilizado para el estudio tal y como se muestra en la *tabla 8*.

| DETERMINACIONES | EXPRESIÓN | VALOR |
|--|------------------|--------------|
| Materia seca | (%) | 65.64 |
| Humedad | (%) | 34.36 |
| PH (Suspensión 1:5) | | 7.41 |
| Conductividad Eléctrica (1:5) | (mmhos/cm) | 1.12 |
| BASE MATERIA SECA | | |
| Cenizas | (%) | 81.32 |
| Materia Orgánica | (%) | 18.68 |
| Carbón Orgánica | (%) | 10.38 |
| Nitrógeno Total | (%) | 0.83 |
| Nitrógeno Disponible | (mg/kg) | - |
| Relación CO:N | | 12.50 |
| Fósforo | (%) | 0.70 |
| P ₂ O ₅ | (%) | 1.60 |
| Potasio | (%) | 0.51 |
| K ₂ O | (%) | 0.61 |
| Calcio | (%) | 1.41 |
| Magnesio | (%) | 0.29 |
| Cobre | (mg/kg) | 74 |
| Zinc | (mg/kg) | 201 |
| Manganeso | (mg/kg) | 518 |
| Hierro | (mg/kg) | 14589 |
| Boro | (mg/kg) | 27 |
| N-NH ₄ | (mg/kg) | - |
| N-NH ₃ | (mg/kg) | - |
| Cloruros | (%) | - |
| Sodio | (%) | - |
| Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) | (meq/100g) | - |

Tabla 8. Análisis químico del compost vegetal utilizado como enmienda orgánica. Fuente: Laboratorio Agropecuario Las Garzas.

4.3. Diseño experimental.

En abril de 2018 se establecieron parcelas experimentales de 3x3 metros en la zona de estudio (Figura 8). A dos parcelas con suelo quemado, se les aplicó un tratamiento con compost vegetal y se llevó a cabo la plantación de las tres especies antes mencionadas (a continuación, denominadas como CPST). En otras dos parcelas también de suelo quemado únicamente se llevó a cabo la plantación de las especies (nombradas CONTROL, C). Para poder comparar los resultados se establecieron dos parcelas con suelo quemado sin ningún tipo de tratamiento (nombradas QUEMA, Q) y otras dos parcelas con suelo no quemado, que lo utilizamos como suelo de referencia (las nombraremos S. VERDE, SV). (2xCPST + 2xC + 2xQ + 2xSV = 8 parcelas de experimentación).



Figura 9. Vista aérea de las parcelas experimentales.

En diciembre de 2018 se recogieron cuatro réplicas de suelo de cada parcela experimental, así como de suelo verde de la zona (suelo que no había sufrido daños en el incendio) y de suelo quemado sin ningún tipo de tratamiento (n=64 u.e.). Estas muestras fueron enviadas a la Universidad Miguel Hernández sin refrigerar más una alícuota refrigeradas para los ensayos microbiológicos.

| | SV | Q | C | CPST |
|--------------------------|-----------|----------|----------|-------------|
| Suelo quemado | NO | SI | SI | SI |
| Plantado | NO | NO | SI | SI |
| Protección Mulch | NO | NO | SI | SI |
| Enmienda orgánica | NO | NO | NO | SI |

Tabla 10. Resumen de los tratamientos aplicados.

4.4. Análisis en el laboratorio.

4.4.1. Carbono Orgánico oxidable

La determinación del CO se realiza mediante el método Walkley y Black, (1934) el cual consiste en la oxidación de la materia orgánica mediante un fuerte oxidante como es el dicromato potásico, para ello es necesario un medio ácido, que se crea añadiendo H₂SO₄. Se deja reaccionar la mezcla y se determina la cantidad de dicromato que no ha reaccionado. Para esta valoración se utiliza Sal de Mohr (sulfato ferroso amónico) ya que es fácilmente oxidable.

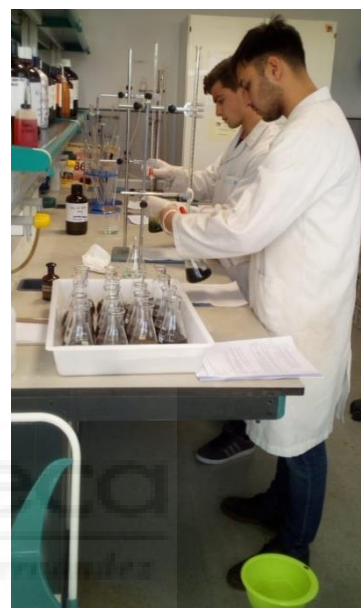


Figura 11 y 12. Erlenmeyers con dicromato potásico y su posterior valoración con Sal de Mohr en la determinación de carbono orgánico.

4.4.2. Nitrógeno

Analizamos el Nitrógeno a través del método de Nitrógeno Kjeldahl, éste consta de tres etapas.

Fase 1: Digestión. En un medio ácido y altas temperaturas, se mineraliza el Nitrógeno orgánico a ion amonio (NH₄⁺).

Fase 2: Destilación. En un medio alcalino gracias al (NaOH), se destila el amonio para su conversión a amoniaco junto al Ácido Bórico.

Fase 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.

4.4.3. Fósforo

La medición del Fósforo se realiza por medio de una recta patrón preparada y la medición de ésta y de las diferentes muestras en el espectrofotómetro. Obtenemos diferentes intensidades de color, por lo que se obtienen diferentes absorciones de longitud de onda gracias a la disolución extractora "Burriel Hernando". En algunas muestras realizamos disoluciones para que entraran en los rangos de nuestra recta patrón.

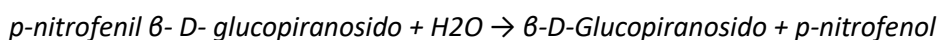


Figura 13. Medición en el espectrofotómetro para la determinación de fósforo.

4.4.5. Actividades enzimáticas:

4.4.5.1 Actividad de Beta Glucosidasa

La actividad β -Glucosidasa es una hidrolasa que interviene en el ciclo del carbono y específicamente actúa en la hidrólisis de los enlaces β -Glucosídicos de las grandes cadenas de carbohidratos. Las hidrólisis de estos sustratos juegan un papel importante en la obtención de energía para los microorganismos del suelo (Eivazi y Zakariah, 1993). El método descrito toma como referencia el estudio de Tabatabai (1982). Se basa en la determinación colorimétrica del p-nitrofenol (PNF) obtenido por la acción de la β - Glucosidasa después de incubar el suelo con el sustrato β -D-glucopiranosido en medio tamponado a pH 6. La incubación se lleva a cabo a 37°C durante 1 hora y el p-nitrofenol liberado se mide en espectrofotómetro después de la adición de CaCl₂ y tampón THAM pH 12. La reacción del ensayo enzimático es la siguiente:



4.4.5.2 Actividad fosfatasa ácida.

La fosfatasa es una hidrolasa que activa la transformación del fósforo orgánico a inorgánico, haciéndolo por tanto asimilable por las plantas.

El método se basa en la determinación espectrofotométrica del p-nitrofenol (PNF) liberado cuando el suelo es incubado a 37°C durante 1 hora con una solución tamponada (pH 6,5 para la fosfomonoesterasa ácida y pH 11,0 para la alcalina) de p-nitrofenil fosfato.

4.4.5.3 Actividad ureasa.

La ureasa es la enzima que cataliza la hidrólisis de la urea o sustratos tipo ureico para dar CO₂ y NH₃ como productos de reacción. Son enzimas exonucleares de origen comúnmente microbiano que también se puede presentar en células animales y vegetales.

La actividad ureasa se determina por la medida del amonio producido por descomposición del sustrato de urea adicionado (Nannipieri et al., 1980). La reacción producida es la siguiente:



Se pesan 0,5 g de suelo se le añaden 2 ml de tampón fosfato 0,1 M y 0,5 ml de disolución de urea 6,4 %. Para cada muestra se prepara un control al que no se añade urea. Se incuba en baño de agua a 20 °C durante 1,5 horas, llevando a continuación el volumen hasta 10 ml con agua destilada. Se centrifuga a 3400 r.p.m. durante 8 minutos. Luego se toma 1 ml del sobrenadante y se lleva a un volumen de 10 ml con 5,8 ml de H₂O, 0,8 ml de citrato sódico, 1,6 ml de la mezcla A y 0,8 ml de la mezcla B. A continuación, se guarda en oscuridad durante 45 minutos. La lectura se realiza en el espectrofotómetro a 660 nm.

- Reactivo A (15,62 g Salicilato sódico más 4 ml Nitroprusiato sódico enrasado a 200 ml con agua destilada). Hay que prepararlo en el momento.
- Reactivo B (0,5 g Dicloroisocianomurato de sodio más 4 g NaOH en 100 ml de agua destilada)

4.4.5.4 Actividad proteasa

Determinación de la actividad Proteasa hidrolizante de la N-benzoil-L-argininamida (BAA) por fundamento análogo al de la actividad ureásica (Nannipieri et al., 1980).

Se pesan 0,5 g de suelo y se le añaden 2 ml de tampón fosfato 0,1 M y 0,5 ml de BAA 0,03 M. Para cada muestra se prepara un control al que no se añade sustrato. Se incuba en baño de agua a 40°C durante 1,5 horas, llevando a continuación el volumen hasta 10 ml con agua destilada. La técnica continúa igual que la descrita en el apartado anterior.

4.4.5.5 Actividad deshidrogenasa

Se utiliza el método de Garcia et al. (1997). En presencia de INT como aceptor de electrones, se produce, en ausencia de tampón, la formación de la correspondiente sal de formazano.

Se pesa 0,1 g de INT (Cloruro de 2-p-iodofenil-3-p-nitrofenil 5-fenil tetrazolio) y se disuelve en 1ml de N,N-dimetilformamida llevándose a un matraz de 25 ml con agua destilada. Se pesa 1 g de muestra tamizada y se lleva a tubos de vidrio en los cuales se añade 0,2 ml de INT 0,4% p:v y agua destilada hasta alcanzar 60% de su capacidad de retención hídrica. Paralelamente se preparan controles sin INT, echando únicamente agua destilada. A continuación, se deja en

oscuridad, a 20°C durante 20 horas. Se adicionan 10ml de metanol y se agita en un agitador vórtex durante 1 minuto. Después se filtra (Papel Whatman nº 40). El extracto rojizo se lee a en espectrofotómetro a 490 nm, y se expresa como mg INTF g⁻¹ suelo. La recta patrón se realiza con INTF en distintas concentraciones.

4.4.6 Respiración edáfica basal y carbono de la biomasa

La respiración edáfica basal (REB) y el carbono de la biomasa (Cmic) se miden en un respirómetro de impedancia (BacTrac 4200 Microbiological Analyser, Sylab, Austria). Este test mide la cantidad de CO₂ 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 CO₂ producido por la actividad biológica de los organismos del suelo. El carbono de la biomasa se determina mediante respiración inducida mediante sustrato, glucosa en este caso, de acuerdo con el método propuesto por Anderson y Domsch (1978)

4.5. Análisis estadístico

Se comprueba la normalidad de los valores con el test de normalidad Shapiro-Wilks, y se procede a la realización de un análisis de varianza ANOVA, y un test post-hoc de Tuckey ($p < 0,05$) para la separación de las medias se asumen varianzas iguales. Se realiza un análisis de correlaciones bivariadas de Spearman entre las variables químicas y las microbiológicas del estudio para testar la relación entre ellas, y un Análisis de Componentes Principales para estudiar la distribución de las variables estudiadas en función de los tratamientos estudiados. Todos los análisis estadísticos se realizan con el programa SPSS versión 24.0 (IBM SPSS statistics 2016).

5. Resultados.

5.1. Efectos de los tratamientos en los suelos

5.1.1. Propiedades químicas

| | SV | | Q | | C | | CPST | |
|----|--------|------|-------|------|--------|-------|---------|-------|
| | media | ds | media | ds | media | ds | media | ds |
| CO | 3,99b | 0,58 | 3,27a | 0,52 | 3,66ab | 0,38 | 5,16c | 1,25 |
| P | 22,03a | 8,08 | 8,06a | 3,88 | 20,78a | 10,19 | 169,14b | 38,90 |
| N | 0,31a | 0,03 | 0,27a | 0,04 | 0,26a | 0,03 | 0,54b | 0,12 |

Las letras minúsculas junto a las medias indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Tabla 14. Principales propiedades químicas (CO: Carbono orgánico; P: fósforo; N: nitrógeno) medidas para los tratamientos SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost).

Como podemos observar en los datos, los contenidos de carbono orgánico, y de los nutrientes N y P fueron superiores significativamente en los suelos que han sido tratados con la enmienda orgánica, compost. En el contenido de Carbono Orgánico (CO) encontramos diferencias significativas claras entre el suelo quemado (Q) siendo el valor más bajo y el suelo verde (SV), entre éstos se encuentra el suelo control (C) con un valor medio y diferenciándose de los tres. Por otro lado, con el contenido en Fósforo (P) los resultados son diferentes, en SV y C tenemos unos valores similares, siendo el doble que en Q. Los suelos CPST en este caso están muy por encima de los otros tratamientos teniendo hasta 8 veces más contenido que en los suelos SV y C. El contenido en Nitrógeno (N) en los suelos Q y C es similar, en el SV aumenta observándose diferencias significativas y de nuevo en CPST es el valor más alto, duplicando el de Q y C.

5.1.2. Propiedades microbiológicas

5.1.2.1. Respiración edáfica basal (RB) y biomasa.

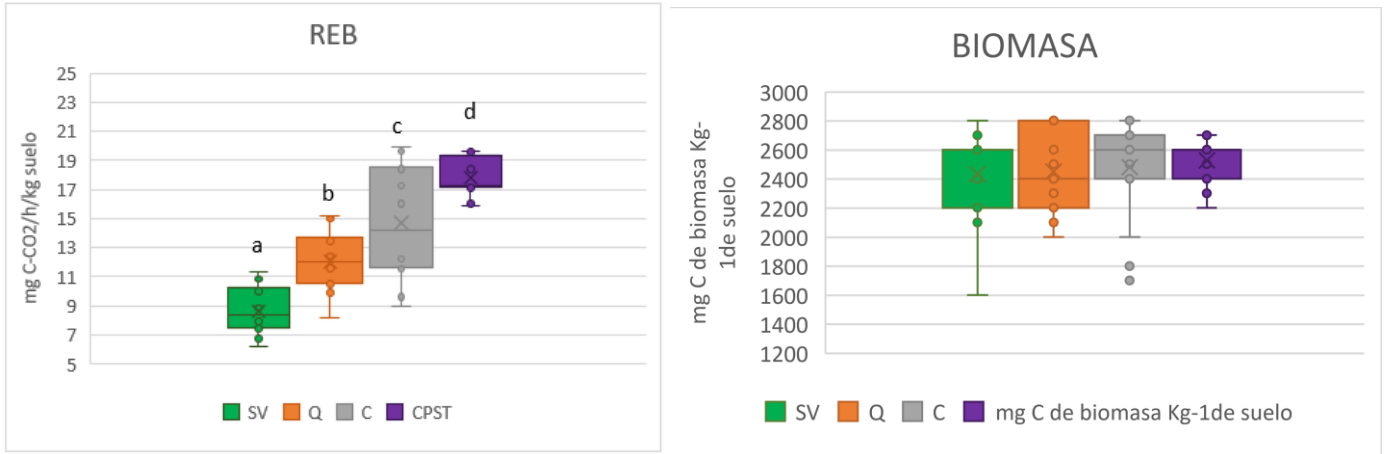


Figura 15 y 16. Datos obtenidos en los tratamientos SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost) de respiración edáfica basal (REB) y carbono microbiano (Cmic). Las letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

Estudiando la respiración edáfica basal, como se puede observar en el gráfico, se presentan diferencias significativas entre los cuatro tratamientos. De menor a mayor producción de CO₂ se encuentra en primer lugar el SV, seguido del Q, C y por último con mayor cantidad el tratamiento CPST. Aunque el rango del C es mucho más amplio que en los otros tratamientos.

Los datos de carbono de la biomasa presentan valores que van desde los 1600mg hasta los 2800mg de C. En el caso de la biomasa no se ha observado diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. El SV presenta una gran variabilidad en los datos.

5.1.2.2. Actividades enzimáticas

Analizamos las actividades enzimáticas de la proteasa, fosfatasa, deshidrogenasa, ureasa y glucosidasa para los cuatro tratamientos.

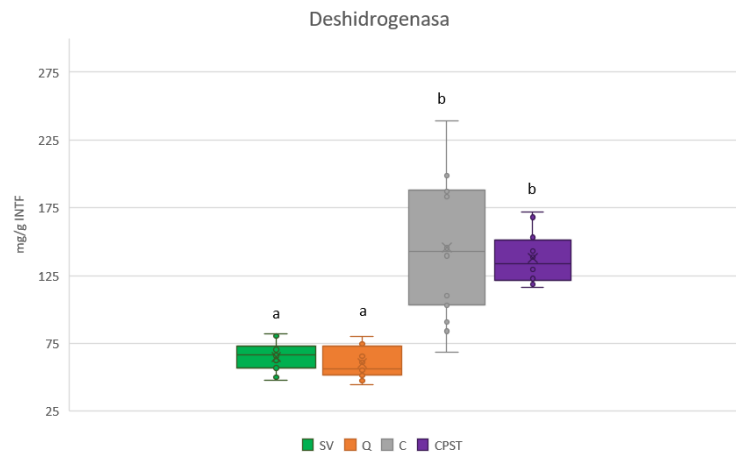


Figura 17. Contenido de la enzima deshidrogenasa (mg/g INTF) en los tratamientos estudiados, SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost). Las letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos.

En los resultados obtenidos por la enzima deshidrogenasa, encontramos diferencias significativas entre los tratamientos SV y Q, con valores más bajos, frente a los tratamientos C y CPST, como se observa en el gráfico.

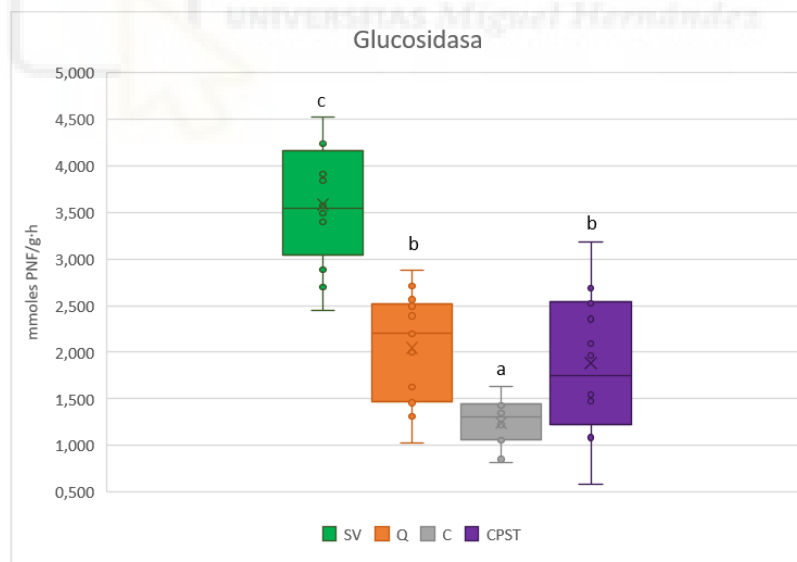


Figura 18. Contenido de la enzima glucosidasa (mmoles PNF/g.h) en los diferentes suelos de los tratamientos estudiados (valores medios \pm desviación estándar). Diferentes letras por encima de las barras indican diferencias significativas).

En el caso de la glucosidasa vemos que el SV presenta el valor más alto, de 3,5 mmoles, diferenciándose del Q y CPST, por debajo de él y sin diferencias significativas entre ellos, y por último encontramos el C con los valores más bajos, con 1,4 mmoles.

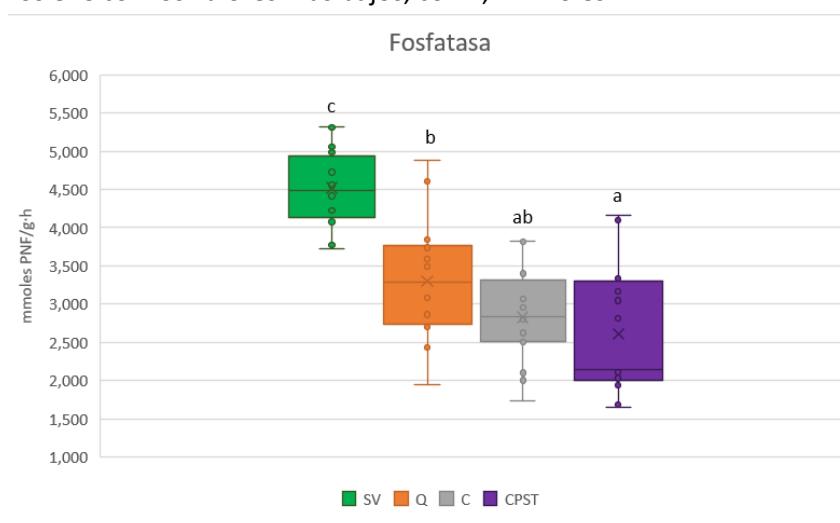


Figura 19. Contenido de la enzima fosfatasa (mmoles PNF/g.h) en los diferentes suelos de los tratamientos estudiados SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost). Las letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

En este caso se observa de nuevo un comportamiento parecido al de la enzima glucosidasa, en el que el SV tiene el valor más alto, siendo significativamente superior a los otros tratamientos. A este valor le siguen los tratamientos en orden Q, C y CPS. Para la enzima fosfatasa el tratamiento con compost ha destacado por presentar los valores significativamente menores del análisis.

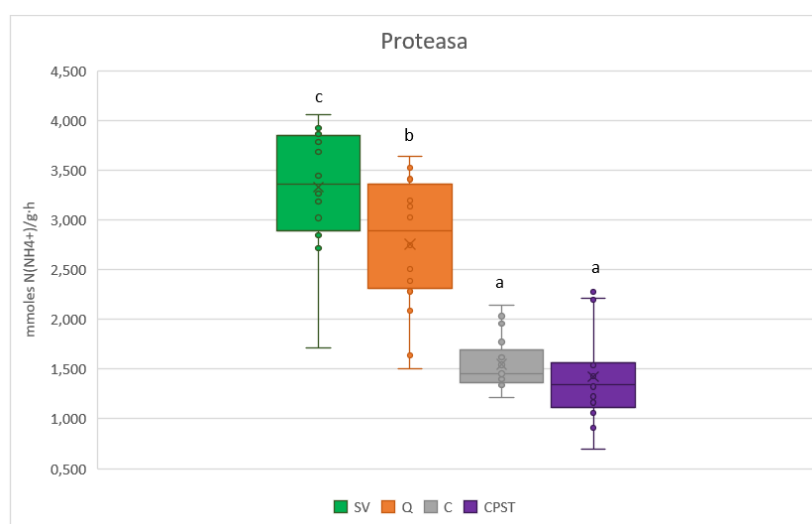


Figura 20. Contenido de la enzima proteasa (mmoles N(NH4+)/g.h) en los diferentes suelos de los tratamientos estudiados SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost). Las letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

En la proteasa se observa de nuevo la misma tendencia en la que el valor más alto lo presenta el suelo verde. Justo por debajo de éste se encuentra el Q, y por último tenemos C y CPST con valores significativamente menores, pero sin diferencias entre ellos.

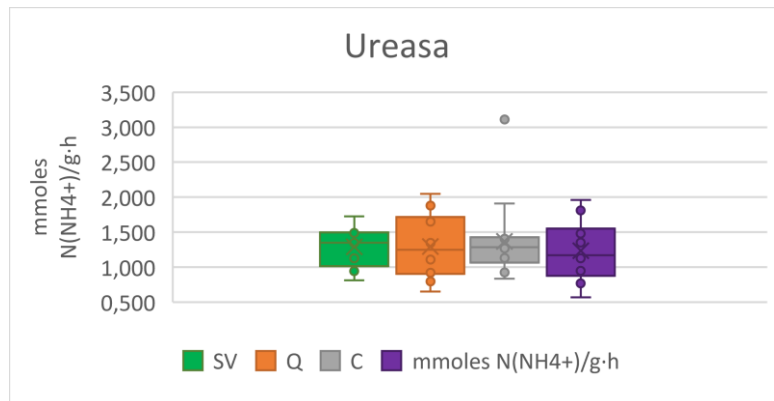


Figura 21. Contenido de la enzima ureasa (mmoles $N(NH_4^+)/g.h$) en los diferentes suelos de los tratamientos estudiados SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost).

En el análisis para la enzima ureasa no se han observado diferencias significativas para los cuatro tratamientos, con valores que oscilan entre 2 y 0,6 mmoles.

Se ha observado una tendencia general en los resultados en cuanto a la glucosidasa, fosfatasa y proteasa, en los que los valores más altos se han presentado en el Suelo Verde, seguidos del control sin tratamiento. Tanto en la fosfatasa y proteasa se han obtenido valores bajos en los suelos tratados con compost, excepto en la glucosidasa alcanzando valores intermedios. Esta tendencia se invierte en el caso de la deshidrogenasa, en la que los valores más altos se han obtenido para el tratamiento con compost, junto con el tratamiento control. Por último, destacan los resultados de la ureasa en los que no se ha detectado ninguna diferencia entre tratamientos.

5.2. Relación entre propiedades químicas y microbiológicas del suelo.

Con el objetivo de analizar las relaciones entre las variables químicas del suelo medidas, CO, P y N, y las propiedades microbiológicas, actividades enzimáticas y biomasa y respiración, realizamos un análisis de correlaciones bivariadas.

| | Fosfatasa | Glucosidasa | Deshidrogenasa | Ureasa | Proteasa | REB | biomasa |
|----|-----------|-------------|----------------|--------|----------|--------|---------|
| CO | | ,292* | ,332** | ,347** | | ,317* | ,340** |
| P | | | ,636** | | -,379** | ,551** | |
| N | | ,299* | ,251* | | | ,362** | |

**** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).**

*** La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).**

Tabla 22. Análisis de correlaciones bivariadas entre variables químicas del suelo (CO, P, N) y las propiedades microbiológicas (Actividades enzimáticas, REB y biomasa)

En este caso hemos relacionado las propiedades químicas y microbiológicas del suelo. Se observa que la deshidrogenasa es la única actividad enzimática que tiene relación con las tres propiedades, siendo esta mayor con CO y especialmente con P y con una menor relación con el N. La glucosidasa se relaciona positivamente y de forma similar con el CO y el N. La ureasa se relaciona únicamente y con alto grado con el CO, por último, la única actividad enzimática que se relaciona de forma negativa es la proteasa con el P, además siendo esta relación de alto nivel.

Por otro lado, la REB se relaciona con las tres propiedades siendo una relación positiva de alto grado con el N y el P y menor grado con el CO, sin embargo, la biomasa solo tiene relación positiva y de alto grado con el CO.

5.3. Respuesta de los tratamientos en el suelo

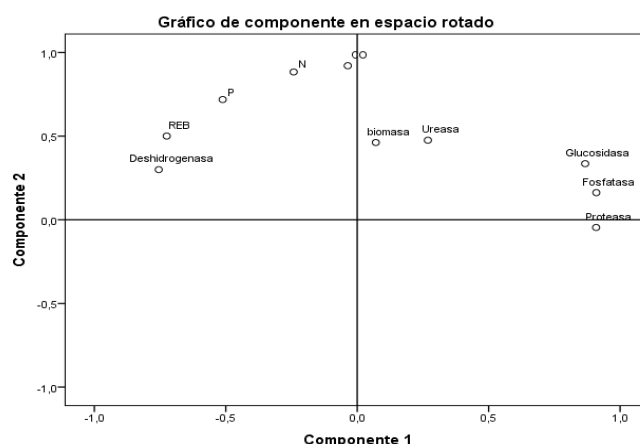
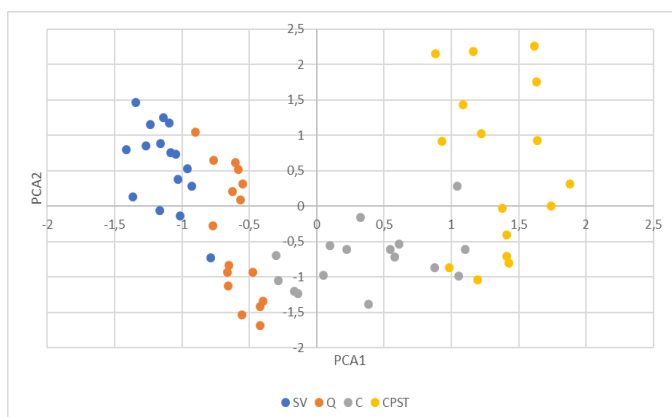


Figura 23 y 24. Matriz rotada del Análisis de Componentes Principales para los diferentes tratamientos del suelo SV (suelo verde), Q (control quemado), C (control plantación) y CPST (compost). Gráfico de componente en espacio rotado.

Con el fin de observar el comportamiento de los suelos frente a los tratamientos, se ha llevado a cabo un análisis de componentes principales. El modelo ha explicado un total de 69,7% de variabilidad, con un 42,53% en el componente 1 y un 27,15% de varianza en el componente 2. En el gráfico podemos observar cómo las muestras de SV y Q se agrupan debido a que su comportamiento es muy parecido. A su vez las muestras de Q se disponen al otro lado del eje relacionándose con C. Inversamente al SV y Q se dispone el CPST mostrando un comportamiento más disperso.

En la figura 24, se observa la dispersión de las variables medidas. En el gráfico vemos cómo se agrupan las actividades enzimáticas glucosidasa, fosfatasa y proteasa, con una respuesta similar y positiva entre ellas, y al otro lado del eje con una respuesta contraria la deshidrogenasa agrupada con la respiración basal, fósforo y nitrógeno. La biomasa y la ureasa tienen poca influencia agrupándose en la zona central del gráfico.

6. Discusión

Tras un incendio forestal con una intensidad como el ocurrido en Chile, se esperan cambios producidos por el fuego tanto de forma directa como indirecta en determinadas propiedades edáficas, debido por una parte al calentamiento producido en los primeros centímetros del suelo, como a los cambios producidos por la nueva situación en la que se encuentra el suelo (desaparición de la cubierta vegetal, depósito de cenizas...) (Mataix-Solera et al., 2009a). Los incendios de alta intensidad suelen provocar la disminución de materia orgánica, la cual se mineraliza durante la combustión, una destrucción de agregados (ya que la materia orgánica

participa en la agregación del suelo) y una disminución de las poblaciones microbianas (Guerrero et al., 2007). Por otro lado, parte de algunos nutrientes se volatilizan, sobre todo el nitrógeno (Certini, 2005). Otros nutrientes pueden quedar en el suelo como cenizas, aunque quedan expuestos a ser lavados con facilidad ya que se aceleran los procesos de escorrentías (Guerrero et al., 2007; Caon et al., 2014). Con el fin de minimizar estos daños y estabilizar las capas de suelo, recuperar la vegetación y mejorar la estructura del suelo lo antes posible, la adición de materia orgánica con alto contenido en macro y micro nutrientes y diversos tipos de microorganismos puede ayudar a recuperar las características del suelo, favoreciendo la restauración de la cubierta vegetal y reduciendo el tiempo necesario para la completa recuperación del suelo (Villar et al., 1998). En el caso de nuestro estudio, observamos la recuperación de algunas propiedades como refleja el aumento del contenido orgánico, el N y el P del suelo, así como los niveles de biomasa y respiración microbiana, coincidiendo con otros estudios como el de Tejeda et al. (2009), en el que se aplicó residuos de materia vegetal compostada en los que se obtuvieron resultados positivos sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas.

El carbono orgánico del suelo es uno de los parámetros que se usa con mayor frecuencia como indicador de un cambio en la calidad del suelo, debido a sus funciones relacionados con el crecimiento de la planta en condiciones naturales, la capacidad de infiltración del agua y el aporte de nutrientes (Muñoz-Rojas et al., 2016). Tal y como se ha observado en los resultados obtenidos, existe una disminución significativa del carbono orgánico en el suelo quemado sin ningún tipo de tratamiento (Q) respecto al suelo verde control (SV), resultado que cabe esperar ya que es una propiedad que se puede modificar drásticamente por el fuego y más si estos son de alta intensidad, consumiéndose en las capas más superficiales (González-Pérez et al., 2004). Cabe destacar que en incendios de baja intensidad en ocasiones se ha observado el incremento de éste debido a la vegetación parcialmente pirolizada (Fernández et al., 1997; Mataix-Solera et al., 2002). Entre los resultados de SV y Q encontramos el tratamiento control, suelos que sufrieron un landfarming y mulching, por lo que se puede atribuir el pequeño aumento de carbono orgánico en comparación con Q gracias a la aplicación del mulch y el posterior desarrollo de vegetación que aporta materia orgánica al suelo (Pereira et al., 2018). Tal y como cabía esperar, la aplicación de un tratamiento orgánico basado en compost de origen vegetal (CPST), presentó una cantidad mayor de carbono orgánico debido a la elevada cantidad de fracción orgánica que contienen (Hueso-González et al., 2018). Este carbono orgánico en un comienzo permite la mejora de la fertilidad del suelo, pero debería monitorizarse su evolución ya que como se observa en el estudio Guerrero et al. (2001), observaron una notable

disminución gradual del carbono orgánico tras el paso de un año, probablemente por los procesos de mineralización de la materia orgánica.

En el caso del fósforo y del nitrógeno, se encuentran resultados similares a los encontrados en el carbono orgánico. En los resultados obtenidos no se encuentra diferencia significativa entre los tratamientos sin adición de enmienda orgánica, SV, Q y C. En el caso del nitrógeno se sabe que a partir de 200°C se mineraliza con facilidad produciéndose pérdidas considerables y suelen ser mayores cuanto mayor son las temperaturas alcanzadas (Guerrero et al., 2005; Durán et al., 2008). En nuestro caso no encontramos este descenso ni en el N y P, esto puede ser debido, a que la rápida mineralización permite que parte del N inorgánico y del P lleguen al suelo junto con las cenizas (Certini, 2005; Caon et al., 2014). En el caso del tratamiento CPST, tanto con el N y P se observan valores muy superiores, doblando a los demás en el caso de N, y que llegan a ser hasta ocho veces mayores en el caso del P comparándolos con los otros tratamientos. Es un dato totalmente esperable ya que el compost vegetal aplicado contiene cantidades considerables de nutrientes como nitrógeno y fósforo tal y como vemos en Guerrero et al. (2007), en cuyo estudio se observó que la aplicación de enmiendas orgánicas como compost incrementaron en el suelo el contenido en N y P.

Diferentes estudios han demostrado que varios aspectos de la presencia microbiana, incluidos número, biomasa, actividad y composición pueden verse afectados por incendios forestales y que estos efectos pueden variar ampliamente dependiendo de severidad del fuego, cambios en algunas propiedades del suelo y condiciones ambientales posteriores al incendio (Fonturbel et al., 2012).

El efecto del fuego en la actividad microbiana como respiración edáfica, puede presentar disparidad de resultados (Mataix-Solera et al., 2009a). En los resultados que se han obtenido se observa de menor a mayor respiración edáfica en los tratamientos SV, Q, C y en último lugar CPST, obteniéndose diferencias significativas para los cuatro tratamientos. En muchos estudios se ha observado un incremento inicial en la respiración asociada a la solubilización de compuestos orgánicos por el calor (Mataix-Solera et al., 2009a), o como vemos en Bárcenas et al. (2011), en el que en su estudio post incendio en diferentes tiempos se observan los valores más altos en la primera medición tras el incendio, explicado a un incremento de nutrientes disponibles a corto plazo. Podríamos explicar la mayor tasa de respiración en los tratamientos de C y CPST gracias al aporte de materia orgánica y nutrientes, lo que resulta beneficioso para la actividad microbiana. Resultado que va acompañado con la relación de la REB con los

resultados en el contenido en CO como muestra la *Figura 18* en los resultados de Spearman, también se observa una mayor relación con el P y N.

Normalmente las temperaturas alcanzadas en el suelo durante un incendio son suficientes para afectar a los microorganismos del suelo, así como a otras propiedades relacionadas con la recolonización post-incendio (Mataix-Solera et al., 2009b). Sin embargo, en nuestros resultados no se han obtenido diferencias significativas entre los diferentes tratamientos en los datos de biomasa microbiana. Podríamos esperar que con el tiempo se viera un aumento de la biomasa microbiana en los tratamientos control, en los que se ha plantado y aplicado mulching (C) y compost (CPST), ya que en diferentes estudios se observado la relación entre el crecimiento de las poblaciones y de la actividad microbiana con el contenido de carbono orgánico soluble en el suelo (Muñoz-Rojas et al., 2016; Moya et al., 2018)

Las actividades enzimáticas del suelo son una expresión directa de la comunidad microbiana del suelo que vincula la disponibilidad de recursos, la estructura y la función de los procesos del ecosistema (Moya et al., 2018), por su naturaleza proteica se ven muy afectadas por el calor por lo que en muchos casos se observan reducciones dependientes de la temperatura alcanzada, pudiéndose encontrar una alta heterogeneidad espacial (Mataix-Solera et al., 2009a). En nuestros datos se observan diferentes resultados dependiendo de la actividad enzimática a la que nos refiramos. El caso de la deshidrogenasa es la única en la que se observa una mayor actividad en los suelos tratados, tanto el control como el compost, que en el suelo de referencia suelo verde, lo que puede ser debido a que se encuentra una relación positiva de alto nivel con el contenido en CO y en P, como se ve en el análisis bivariado Spearman (*Figura 18*). En las otras tres actividades enzimáticas, glucosidasa, fosfatasa y proteasa, muestran resultados similares entre ellas, en los que se observa una mayor actividad enzimática en el Suelo Verde y en un segundo lugar el suelo Quemado. En la proteasa y en la fosfatasa se encuentra con la menor actividad los suelos tratados, tanto el C como el CPST. En trabajos como el de Fonturbel et al. (2012), se observa una disminución inmediata que se ve prolongada en el tiempo en las enzimas glucosidasa y ureasa tras un incendio forestal indicando su gran sensibilidad, en este trabajo señala estudios en los que se han encontrado las mismas disminuciones (visto en Fonturbel et al., 2012; Ajwa et al., 1999; Boerner and Brinkman, 2003; Boerner et al., 2000; Eivazi and Bayan, 1996). En este mismo estudio también encuentran disminuciones en la enzima fosfatasa, disminución que se ve muy afectada en incendios de gran intensidad.

En este trabajo no se encuentran valores más altos en las actividades enzimáticas en los suelos que se ha aplicado el tratamiento con materia orgánica (CPST). La materia orgánica que se

agrega al suelo mejora las propiedades físicas del suelo, pero necesita un tiempo para mineralizar y suministrar los nutrientes necesarios para los cultivos (Tejada et al., 2006).

7. Conclusión y proyecciones futuras.

En definitiva, tras los análisis realizados y el estudio de los resultados, junto con la revisión de cantidad de trabajos sobre incendios, y manejos post-incendios relacionados con las propiedades edáficas, así como de enmiendas orgánicas, podemos proponer las siguientes conclusiones:

i) Tras el incendio, se observa una reducción en la mayoría de las propiedades estudiadas entre el suelo de referencia y el quemado.

ii) La adición de compost ayuda a mejorar la calidad del suelo tras el incendio, observándose una mejora en la mayoría de las propiedades químicas estudiadas relacionadas con la fertilidad del mismo, principalmente CO, P y N.

iii) La adición de compost ha incrementado la actividad microbiana del suelo, observado en una mayor respiración basal del suelo. Las actividades enzimáticas se han comportado de forma distinta dependiendo de la misma; mientras que la deshidrogenasa aumenta con la adición del compost, la glucosidasa, fosfatasa y proteasa no aumenta, pero sí se ven afectadas por el incendio.

La primera conclusión puede parecer obvia ya que en un incendio de tales dimensiones como el que ocurrió en Chile se espera que las propiedades edáficas, en cuanto a contenido de nutrientes, bajen, viéndose mermada la calidad del suelo temporalmente. Es cierto que en algunas propiedades no se ha obtenido una disminución significativa en los resultados.

Sobre la segunda conclusión, se observa un aumento en las propiedades químicas estudiadas, esto es en la cantidad de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo. Como hemos comentado durante el trabajo, la cantidad de materia orgánica y nutrientes no solo hacen mejorar las propiedades físicas del suelo sino también las microbiológicas, tal y como muestran los resultados obtenidos para la REB, por lo que este aumento hará mejorar la calidad del suelo.

Esta mejora observada en la cantidad y actividad microbiana, no se ha traducido en un aumento de las actividades enzimáticas estudiadas que se han mostrado siempre más bajas que en el

suelo de referencia. Suponemos que es necesario más tiempo para que las enzimas afectadas por el incendio muestren una recuperación en la salud del suelo.

En este estudio, como proyecciones futuras sería altamente interesante y recomendable realizar un seguimiento de los análisis realizados que sirva para observar si realmente la enmienda orgánica adicionada mantiene en el tiempo la mejora de las propiedades químicas y si realmente va a ser una mejora para las propiedades microbiológicas, debido a este aporte extra de materia orgánica y nutrientes. Este estudio ha demostrado que la aplicación de compost es un tratamiento post-incendio que recupera de forma general las propiedades del suelo, pero un monitoreo es necesario para poder recomendar este tratamiento de forma extensiva.



8. Referencia bibliográfica.

Ajwa, H., Dell, C.J., Rice, C.W., 1999. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tall grass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 769–777.

Bárcenas-Moreno, G., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Mataix-Beneyto, J., & Bååth, E. (2011). Soil microbial recolonisation after a fire in a Mediterranean forest. *Biology and Fertility of soils*, 47(3), 261-272.

Boerner, R.E.J., 1992. Fire and nutrient cycling in temperate ecosystems. *Bio. Sci.* 32, 187±192.

Boerner, R.E.J., Brinkman, J.A., 2003. Fire frequency and soil enzyme activity in southern Ohio oak–hickory forests. *Applied Soil Ecology* 23, 137–146.

Boerner, R.E.J., Decker, L.M., Sutherland, E.K., 2000. Prescribed burning effects on soil enzyme activity in a southern Ohio hardwood forest: a landscape-scale analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 899–908.

Brito, B., Fuenzalida, P., Martín, C., Pinochet, C., Santana, J., Rojas, C. (2019). Recuperación de salud de suelos y su implicación en el restablecimiento de bosque nativo incendio en zonas del secano de la VI región. *Revista de divulgación FPA 6-RE-002-2018*

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.

Carreira, J. A. y Niell, F. X. (1992), Plant nutrient changes in a semi-arid Mediterranean shrubland after fire. *Journal of Vegetation Science*, 3: 457-466.

Castillo, M. (2006). El cambio del paisaje vegetal afectado por incendios en la Zona Mediterránea Costera de la V Región. Tesis de Grado de Magíster en Geografía. Universidad de Chile.

Castillo, M., Julio, G., Garfía, R. (2014). Current status of risk and prognosis of forest fires in Chile. Progress and future challenges. In D. Paton (Ed.), *Wildfire Hazards, Risks and Disasters* (pp. 59-75). Amsterdam, Elsevier.

CONAF (2017). Incendios forestales en Chile. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. Retrieved on April 2017.

DeBano, L.F., y Conrad, C.E. (1978). The effect of fire on nutrients in a chaparral ecosystem. *Ecology* 59, 489-497.

Durán, J., Rodríguez, A., Fernández-Palacios, J.M. y Gallardo, A. 2008. Changes in soil N and P availability in a *Pinus canariensis* fire chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 256, 384-387.

Eivazi, F., Bayan, M.R., 1996. Effects of long term prescribed burning on the activity of select soil enzymes in an oak hickory forest. *Canadian Journal of Forest Research* 26, 1799–1804

Fernández, I., Cabaneiro, A. y Carballas, T. 1997. Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating. *Soil Biology & Biochemistry*, 29, 1-11

Fontúrbel, M. T., Barreiro, A., Vega, J. A., Martín, A., Jiménez, E., Carballas, T., ... & Díaz-Raviña, M. (2012). Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. *Geoderma*, 191, 51-60.

Giusquiani, P. L., M. Pagliai, G. Gigliotti, D. Businelli, and A. Benetti. (1995). Urban Waste Compost: Effects on Physical, Chemical, and Biochemical Soil Properties. *J. Environ. Qual.* 24:175-182.

González, D. C., & Rios, R. C. (2009). Fire danger, fire detection, quantification of burned areas and description of post-fire vegetation in the central area of Chile. In *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems* (pp. 55-70). Springer, Berlin, Heidelberg.

González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G. y Knicker, H. 2004. The effect of fire on soil organic matter a review. *Environment Internacional*, 30, 855-870.

Guénon, R., Vennetier, M., Dupuy, N., Roussos, S., Pailler, A. and Gros, R. (2013). Trends in recovery of mediterranean soil chemical properties and microbial activities after infrequent and frequent wildfires. *Land Degrad. Dev.*, 24: 115-128

Guerrero, C., Gómez, I., & Mataix-Solera, J. (2007). El uso de enmiendas en la restauración de suelos quemados. *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoi, Alicante*, 119-154.

Guerrero, C., Gómez, I., Moral, R., Mataix-Solera, J., Mataix-Beneyto, J., & Hernández, T. (2001). Reclamation of a burned forest soil with municipal waste compost: macronutrient dynamic and improved vegetation cover recovery. *Bioresource Technology*, 76(3), 221-227.

Guerrero, C., Gómez, I., Solera, J. M., Moral, R., Beneyto, J. M., & Hernández, M. T. (2000). Effect of solid waste compost on microbiological and physical properties of a burnt forest soil in field experiments. *Biology and Fertility of Soils*, 32(5), 410-414.

Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Gómez, I., García-Orenes, F. y Jordán, M.M. 2005. Microbial recolonization and chemical changes in a soil heated at different temperatures. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 385-400

Kowaljow, E., y Mazzarino, M. J. (2007). Soil restoration in semiarid Patagonia: Chemical and biological response to different compost quality, *Soil Biology and Biochemistry*. 39: 7, 1580-1588.

Kozlowski, T. T. (Ed.). (2012). *Fire and ecosystems*. Amsterdam, Elsevier.

Madsen, M. D., Kostka, S. J., Inouye, A. L., Zvirzdin, D. L. (2012). Postfire restoration of soil hydrology and wildland vegetation using surfactant seed coating technology. *Rangeland Ecology & Management*, 65, 253-259.

Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M., Torres, M. P., & Barcenas, M. (2009b). Forest fire effects on soil microbiology. *Fire effects on soils and restoration strategies*, 5, 133-175.

Mataix-Solera, Jorge & Guerrero, César & Arcenegui, Vicky & Bárcenas-Moreno, G. & Zornoza, Raúl & Pérez-Bejarano, Andrea & Bodí, Merche B. & Mataix-Beneyto, Jorge & Gómez Lucas, Ignacio & García-Orenes, Fuensanta & Navarro-Pedreño, Jose & Manuel Miguel, Jordan & Cerdà, Artemi & Doerr, S.H. & Ubeda, Xavier & Outeiro, Luís & Pereira, Paulo & Jordán, Antonio & Zavala, Lorena. (2009a). *Los incendios forestales y el suelo: un resumen de la investigación realizada por el Grupo de Edafología Ambiental de la UMH en colaboración con otros grupos*.

Moya, D., González-De Vega, S., García-Orenes, F., Morugán-Coronado, A., Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., ... & De las Heras, J. (2018). Temporal characterisation of soil-plant natural recovery related to fire severity in burned *Pinus halepensis* Mill. forests. *Science of The Total Environment*, 640, 42-51.

Munoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Martini, D., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. *Ecological Indicators*, 63, 14-22.

Onodera, S. I., y van Stan II, J. T. (2011). Effect of forest fires on hydrology and biogeochemistry of watersheds. In Levia, D. F., Carlyle-Moses, D., Tanaka, T. (Eds.) *Forest Hydrology and Biogeochemistry* (pp. 599-621). Netherlands, Springer.

Pausas, J. G. (2012). *Incendios forestales. Una visión desde la ecología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España).

Peña-Fernández, E., y Valenzuela-Palma, L. (2008). Incremento de los incendios forestales en bosques naturales y plantaciones forestales en Chile. In *Memorias del segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales: Una visión global* (pp. 595-612).

Pereira, P., Francos, M., Brevik, E. C., Ubeda, X., & Bogunovic, I. (2018). Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 26-32.

Pritchett, W.L., y Fisher, R.F. (1987). *Properties and Management of Forest Soils*. Wiley, New York.

Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2006). Crushed cotton gin compost on soil biological properties and rice yield. *European journal of agronomy*, 25(1), 22-29.

Tejada, M., Hernandez, M. T., & Garcia, C. (2009). Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research*, 102(1), 109-117.

Vallejo, V. R., Arianoutsou, M., Moreira, F. (2012). Fire ecology and post-fire restoration approaches in Southern European forest types. In F. Moreira, M. Arianoutsou, P. Corona, J. De las Heras, (Eds.) *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests* (pp. 93-119). Netherlands, Springer.

Van Wagtendonk, J. W., Root, R. R., & Key, C. H. (2004). Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 397-408.

Vázquez, F.J., Acea, M.J., Carballas, T. (1993). Soil microbial populations after wildfire. *FEMS Microb. Ecol.* 13, 93-104.

Villar, M.C., Gonzalez-Prieto, S.J., Carballas, T. (1998). Evaluation of three organic wastes for reclaiming burnt soils: Improvement in the recovery of vegetation cover and soil fertility in pot experiments. *Biol. Fertl. Soils* 26, 1222-1229.

AGRADECIMIENTOS

Me han enseñado que la vida es tomar decisiones y cerrar etapas, así cierro una muy importante, una que empezó con una dura decisión cuando tenía 17 años. Una que empezó en León y acaba en Elche.

Quisiera agradecer a todas las personas que me han acompañado en esta etapa haciéndola mucho más fácil. Sobre todo, a cada profesor y compañero que me han ayudado a la hora de poder compatibilizar el deporte de élite con los estudios universitarios. A mis compañeros de clase que cuando llegue perdida a esta universidad me acogieron y acompañaron durante estos dos años. En mi etapa por Elche quisiera mencionar a Gau y Andrea, habéis hecho que “la vasca” encuentre un hogar entre tanta palmera.

Tengo que hacer mención especial a mis compañeros de laboratorio Ferran y Nazim, sin los cuales no hubiese sido posible este trabajo. Por todas las horas metidos en el laboratorio, entre el caos y orden de las muestras.

Si tengo que dar las gracias a alguien por este trabajo es a Minerva. Infinitamente gracias, desde el primer día que pisé el laboratorio hasta mi último de universidad. Por tu paciencia infinita, por cada consejo, cada reunión, cada mensaje fuese el día y la hora que fuese. Así como a Fuen, gracias por darme esta oportunidad para realizar este estudio, por todo lo aprendido, no solo por ser mi tutora sino por ser una de las mejores profesoras de universidad que he tenido.

Por último, quiero dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres. Por darme siempre las fuerzas para el último empujón, por seguirme por toda España, por cada ánimo, cada llamada. Por sentirnos cerca estando a más de 700km.

En definitiva, gracias a cada persona que ha hecho que pueda concluir esta etapa de la mejor forma. “A las palabras: esfuerzo, trabajo y humildad, súmale observar, aprender y disfrutar”.