



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la revegetación de suelos quemados mediante la
encapsulación de nutrientes*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Francisco James Asensi Froud

DIRECTORES: Rosa Devesa Rey

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la revegetación de suelos quemados mediante la
encapsulación de nutrientes*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo evalúa la eficacia de la encapsulación de nutrientes como estrategia para la revegetación y recuperación ecológica de suelos quemados por incendios forestales. A través de una investigación experimental, se analizó el impacto de dos tipos diferentes de cápsulas con nutrientes esenciales en la germinación, el crecimiento inicial de las plantas y en las propiedades generales de los suelos quemados.

Los resultados obtenidos indicaron una mejora moderada en la germinación y el desarrollo inicial de la vegetación, particularmente en suelos sometidos a tratamientos térmicos menos severos. Sin embargo, en condiciones más extremas, la eficacia de la encapsulación de nutrientes se vio considerablemente limitada. Aunque se observó cierta mejora en las propiedades del suelo, el impacto global resultó ser menos significativo de lo esperado.

En conclusión, la encapsulación de nutrientes puede constituir una técnica prometedora para la restauración ecológica de suelos afectados por incendios forestales, aunque su eficacia depende notablemente de las condiciones específicas del suelo tratado. Para mejorar su efectividad, se recomienda complementar esta técnica con otras estrategias de restauración ecológica, favoreciendo así una revegetación más eficaz y una recuperación más rápida y completa del suelo.

PALABRAS CLAVE

Revegetación, Suelos quemados, Encapsulación de nutrientes, Incendios forestales, Restauración ecológica

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer sinceramente a mi tutora por su orientación constante y efectiva durante todo el desarrollo de este trabajo. Su dedicación, esfuerzo y la claridad con la que me ha guiado en cada etapa, especialmente considerando las dificultades adicionales de coordinar los horarios complejos de tres infantes en la Escuela Naval Militar, han sido fundamentales para llevar a cabo este proyecto con éxito.

Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento al Centro Universitario de la Defensa por brindarme acceso a sus laboratorios e instalaciones, así como por la sólida formación académica proporcionada. Su apoyo ha sido crucial para adquirir las competencias necesarias que han permitido el desarrollo efectivo de este trabajo.

Finalmente, y de manera muy especial, deseo agradecer de corazón a mi familia por su apoyo incondicional y constante. Desde que decidí emprender mi camino para convertirme en Oficial de Infantería de Marina, ellos han estado siempre presentes, ofreciéndome ánimo y fuerza en cada momento complicado. Gracias a su amor, paciencia y los valores que me han inculcado, he logrado avanzar con determinación hacia el objetivo que ahora está cerca de cumplirse: convertirme en Teniente de Infantería de Marina el próximo 16 de julio. A vosotros, mi familia, os dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción general a los incendios forestales	7
1.2 Impacto de los incendios forestales.....	8
1.2.1 Impacto Ecológico	8
1.2.2 Impacto Económico y Social	8
1.3 Frecuencia y tendencias actuales	9
1.4 Causas principales de los incendios forestales.....	10
1.4.1 Causas naturales.....	10
1.4.2 Causas antropogénicas.....	11
1.5 Justificación del estudio y objetivos del TFG	12
2 Estado del arte	13
2.1 Introducción del estado del arte	13
2.2 Impacto de los incendios forestales en el suelo y su regeneración	13
2.2.1 Transformaciones en el suelo post-incendio.....	13
2.2.2 Alteraciones físicas al suelo tras un incendio	15
2.2.3 Cambios químicos en el suelo	16
2.2.4 Impacto en la biología del suelo	18
2.3 Estrategias tradicionales de restauración de suelos quemados	19
2.3.1 Técnicas de restauración pasiva y activa	19
2.3.2 Uso de fertilizantes convencionales en la recuperación del suelo	20
2.3.3 Técnicas de bioingeniería para la recuperación del suelo.....	21
2.3.4 Técnicas de revegetación para la estabilización del suelo.....	23
2.4 Encapsulación de nutrientes como estrategia innovadora para la restauración del suelo	25
2.4.1 Principios de la encapsulación de nutrientes	25
2.4.2 Tipos de materiales utilizados en la encapsulación	26
2.4.3 Aplicación de la encapsulación de nutrientes en el suelo post-incendio	28
2.4.4 Evaluación del impacto de la encapsulación en la revegetación	29
2.5 Desafíos y futuras líneas de investigación en la restauración de suelos quemados	30
2.5.1 Limitaciones actuales en la recuperación de suelos post-incendio.....	30
2.5.2 Nuevas perspectivas en la investigación de suelos post-incendio	31

2.5.3 Relevancia de políticas de gestión y conservación del suelo.....	32
3 Desarrollo del TFG.....	35
3.1 Materiales y Métodos.....	35
3.1.1 Área de estudio	35
3.1.2 Materiales Utilizados.....	35
3.1.3 Procedimiento de quemado de las muestras a distintas temperaturas en laboratorio y caracterización inicial.....	37
3.1.4 Procedimiento experimental del ensayo de fitotoxicidad	39
3.1.5 Procedimiento experimental del ensayo de hidrofobia del suelo	41
3.1.6 Preparación de hidrotalcita	42
3.1.7 Elaboración de Cápsulas de Nutrientes	45
3.1.8 Ensayo final de germinación y crecimiento vegetal con cápsulas de nutrientes	48
4 Resultados.....	50
4.1 Resultados del análisis de propiedades fisicoquímicas del suelo tras tratamiento térmico	50
4.1.1 Contenido de potasio (K),nitrógeno (N) y fósforo (P).....	50
4.2 Resultados del ensayo de fitotoxicidad.....	57
4.3 Ensayos Hidrofobicidad del suelo tras tratamientos térmicos	58
4.4 Resultados del ensayo de germinación y crecimiento vegetal tras la aplicación de cápsulas con hidrotalcita y macronutrientes en suelos tratados térmicamente	59
5 Conclusiones y líneas futuras.....	62
5.1 Conclusiones.....	62
5.2 Líneas Futuras.....	62
6 Bibliografía.....	64
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	70
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mapa de Incendios Forestales [3]	6
Figura 1-2 Emisiones de carbono a escala mundial derivadas de los incendios [6].....	7
Figura 1-3 Avión Anfíbio Tipo 1 FOCA [7]	8
Figura 1-4 Incendio Forestal en España [9]	10
Figura 1-5 Rayo causa incendio forestal en Alberta, Canadá [10].....	11
Figura 1-6 Cigarrillo como foco de incendio forestal [11].....	11
Figura 2-1 Dr. Jiménez Morillo (izquierda) y Dr. Clemente Salas (derecha) en el parque nacional de Doñana realizando estudios del suelo tras incendio forestal [18]	15
Figura 2-2 Biocarbón como estabilizador del pH del suelo [24].....	17
Figura 2-3 Reforestación que se lleva a cabo en el parque regional de Calblanque [30].....	20
Figura 2-4 Fertilizantes para recuperación del suelo [31]	21
Figura 2-5 Parcela Tratada con mulch de paja en el incendio de Cercedo 2006 [34].....	22
Figura 2-6 Barreras de tela biodegradable para prevenir la erosión del suelo [36].....	22
Figura 2-7 Talud tratado con matas orgánicas e hidrosiembra [40]	24
Figura 2-8 Voluntariado ambiental en el paraje del Puerto de las Palomas [42]	24
Figura 2-9 Voluntarios para la replantación en zona afectada por incendio en el Parque de Doñana [44]	25
Figura 2-10 Iniciativa Emblemática de Restauración Mundial de la ONU - iniciativa de Restauración de los Bosques Mediterráneos, Líbano [47].....	33
Figura 3-1 Medidor de pH de suelo 6 en 1 [49]	36
Figura 3-2 Medidor Niveles N,P,K [50].....	36
Figura 3-3 Bandejas semillero con lámpara de germinación [51].....	37
Figura 3-4 Esquema del procedimiento general del TFG	38
Figura 3-5 Mufla Nabertherm empleada para tratamiento térmico de muestras [52]	38
Figura 3-6 Agitadora Cienytech para preparación de mezcla	39
Figura 3-7 Sistema de filtración por vacío	40
Figura 3-8 Muestras de semillas con extracto acuoso filtrado	40
Figura 3-9 Captura de prueba con muestra de suelo tratado a 300°C durante 60 minutos.....	41
Figura 3-10 Captura de análisis de muestra mediante software informático	42
Figura 3-11 Agitado mezcla a 400 rpm.....	43
Figura 3-12 Montaje elaboración hidrotalcita	44
Figura 3-13 Montaje filtración de hidrotalcita	44
Figura 3-14 Cloruro de sodio (HCl) para elaboración de disolución acuosa	45
Figura 3-15 Mezcla de macronutrientes (NH ₄ Cl, KH ₂ PO ₄ y KNO ₃)	46

Figura 3-16 Sodio alginato.....	46
Figura 3-17 Adición de mezcla de macronutrientes y alginato de sodio a disolución de cloruro de sodio mediante jeringuilla para creación de perlas	46
Figura 3-18 Mezcla de hidrotalcita y Sodio Alginato sobre agitador magnético.....	47
Figura 3-19 Creación de perlas de hidrotalcita.....	47
Figura 3-20 Muestra de tierra con 5 semillas y 5 cápsulas de hidrotalcita.....	48
Figura 3-21 Muestra de tierra con 5 semillas y 5 cápsulas de macronutrientes	48
Figura 4-1 Valor de potasio presente en la muestra sometida a 100°C durante 5 minutos	51
Figura 4-2 Valor de nitrógeno presente en la muestra sometida a 100°C durante 60 minutos	52
Figura 4-3 Valor de fósforo presente en la muestra sometida a 300°C durante 30 minutos	53
Figura 4-4 Datos tomados muestra a 100°C durante 5 minutos	55
Figura 4-5 Muestras ensayo de fitotoxicidad	58
Figura 4-6 Análisis hidrofobicidad muestra a 300°C durante 60 minutos	59
Figura 4-7 Plántulas muestra con tratamiento a 100°C durante 30 minutos y con cápsulas de hidrotalcita.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Tabla comparativa de materiales para encapsulación	27
Tabla 4-1 Resultados de nutrientes (N, P, K) en muestras de suelo sometidas a tratamientos térmicos	50
Tabla 4-2 Variación del contenido de potasio (K) en suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.....	51
Tabla 4-3 Variación del contenido de nitrógeno (N) en el suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.....	52
Tabla 4-4 Variación del contenido de fósforo (P) en suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.....	53
Tabla 4-5 Resultados propiedades del suelo tras tratamientos térmicos	54
Tabla 4-6 Variación de la fertilidad del suelo (conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$) tras diferentes tratamientos térmicos	55
Tabla 4-7 Pérdida de humedad del suelo (%) según temperatura y tiempo de exposición térmica	56
Tabla 4-8 Variación del pH del suelo tras tratamientos térmicos a diferentes temperaturas y tiempos	56
Tabla 4-9 Resultados del ensayo de fitotoxicidad: semillas germinadas y crecimiento promedio según tratamientos térmicos aplicados al suelo.	57
Tabla 4-10 Evolución de la longitud media (cm) del crecimiento de semillas germinadas según tratamientos térmicos del suelo.....	57
Tabla 4-11 Resultados de germinación y crecimiento vegetal tras aplicación de cápsulas con hidrotalcita y macronutrientes en suelos sometidos a distintos tratamientos térmicos.....	60
Tabla 4-12 Gráfica comparativa crecimiento plántulas con cápsulas de hidrotalcita y de nutrientes	61

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los incendios forestales son una de las principales amenazas que existen hoy en día para los ecosistemas terrestres, impactando significativamente a la biodiversidad, a la calidad del suelo y al equilibrio climático. A pesar de que históricamente hayan sido parte del ciclo natural en muchos entornos, en las últimas décadas su frecuencia y gravedad han aumentado significativamente debido a factores como pueden ser el cambio climático, el uso inapropiado del suelo y la intervención humana en zonas sensibles.

Según datos obtenidos del programa de medio ambiente de las Naciones Unidas se estima que alrededor de 423 millones de hectáreas de terreno se queman cada año en el mundo, más que lo equivalente a la superficie total de la Unión Europea (alrededor de 400 millones de hectáreas) [1].

Los incendios no solo destruyen la vegetación, sino que también alteran la composición del suelo, afectando a su fertilidad y su capacidad de regeneración. La pérdida de nutrientes esenciales como el nitrógeno, potasio y el fósforo dificultan la recuperación de forma natural de los ecosistemas afectados, así como la degradación del suelo aumenta la erosión y disminuye su capacidad de retención de agua, empeorando el proceso de desertificación.

En algunas regiones como España, los incendios forestales son un problema frecuente que tiene graves repercusiones tanto ambientales como económicas. Entre los años 1968 y 2021, se registraron más de 603.000 incendios, que afectaron a aproximadamente 7,65 millones de hectáreas [2] (Figura 1-1).

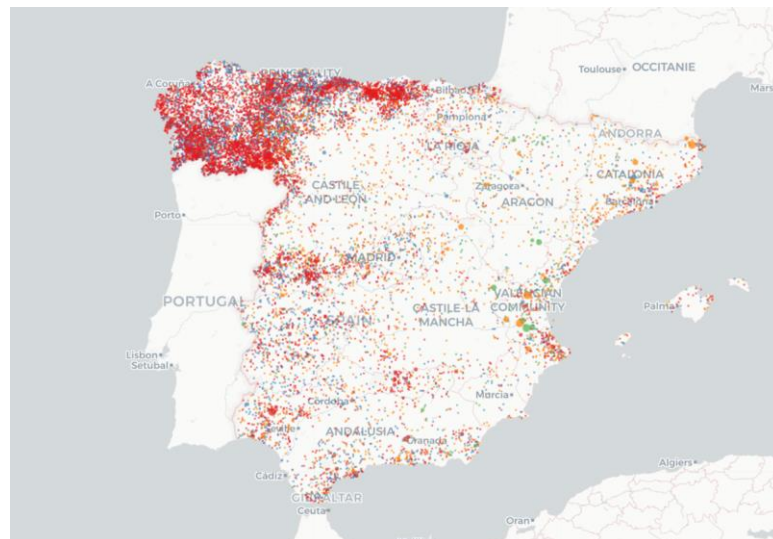


Figura 1-1 Mapa de Incendios Forestales [3]

La regeneración de estos ecosistemas depende de múltiples factores, pero la restauración del suelo es un elemento clave para evitar la degradación a largo plazo y garantizar la recuperación de la vegetación autóctona. Frente a esta situación, se han desarrollado varias estrategias para mejorar la recuperación de suelos quemados. Una de ellas es la encapsulación de nutrientes, que surge como una técnica prometedora para optimizar la fertilización en suelos degradados. A diferencia de los fertilizantes convencionales, esta tecnología permite una liberación controlada y prolongada de los nutrientes esenciales, minimizando su lixiviación y aumentando su disponibilidad para las plantas.

En este trabajo se busca evaluar el impacto de la encapsulación de nutrientes en la revegetación de suelos quemados tras incendios forestales, estudiando cómo influye en la recuperación de la fertilidad del suelo, la retención de nutrientes y el crecimiento de vegetación. Con ello se busca aportar información relevante para la mejora de las estrategias de restauración forestal.

1.1 Introducción general a los incendios forestales

Los incendios forestales son fenómenos naturales que han existido durante millones de años, desempeñando un papel crucial en la regeneración de ciertos ecosistemas. Sin embargo, en las últimas décadas, su frecuencia, intensidad y duración han aumentado significativamente debido a factores como el cambio climático y la intervención humana en áreas forestales. Estos eventos no solo afectan a la biodiversidad, sino que también a la calidad del suelo, la disponibilidad de agua y la estabilidad atmosférica.

En torno al 55% de los incendios forestales en España se deben a la acción del ser humano, ya sea intencionadamente o por negligencia [4]. Los ecosistemas más susceptibles a incendios incluyen bosques mediterráneos, sabanas tropicales, taigas boreales y ciertas zonas de matorral seco, donde la vegetación acumulada actúa como material altamente inflamable. En estos entornos, el fuego puede propagarse rápidamente, dificultando las labores de extinción y aumentando el impacto sobre la fauna y la flora.

El impacto de los incendios forestales no se limita a la pérdida de vegetación. También generan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global. En 2021, los incendios forestales emitieron aproximadamente 1.76 gigatoneladas de CO_2 , una cantidad superior a las emisiones anuales de la aviación mundial [5]

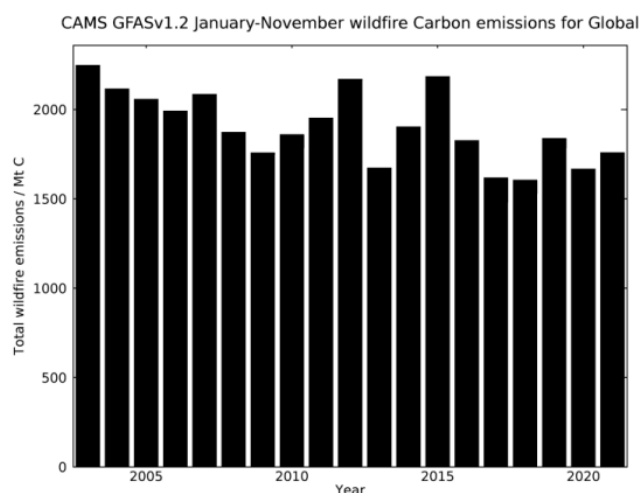


Figura 1-2 Emisiones de carbono a escala mundial derivadas de los incendios [6]

Dado su impacto ambiental y social, la gestión de incendios forestales se ha convertido en un desafío clave para los gobiernos y las organizaciones internacionales. Como consecuencia de esto se han desarrollado estrategias de prevención y restauración, desde el manejo de combustibles forestales hasta la implementación de técnicas avanzadas de regeneración ecológica. Entre estas últimas, la

encapsulación de nutrientes está emergiendo como una alternativa viable para optimizar la recuperación del suelo y acelerar la revegetación en áreas afectadas.

1.2 Impacto de los incendios forestales

Los incendios forestales tienen graves consecuencias en diferentes ámbitos, afectando tanto al medio ambiente como a la economía y la sociedad. La gravedad de estos impactos depende de factores como la intensidad, frecuencia y extensión del fuego, así como de las características específicas del entorno afectado.

1.2.1 Impacto Ecológico

Los incendios forestales provocan la destrucción de la vegetación, dejando el suelo expuesto y susceptible a la erosión. Esta pérdida de cobertura vegetal reduce la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, afectando negativamente a su fertilidad y a estructura. Además, la desaparición de la vegetación incrementa la vulnerabilidad de las plantas y árboles a plagas y enfermedades, deteriorando su capacidad de crecimiento y recuperación.

La fauna silvestre es también víctima de los incendios forestales, ya que el fuego destruye su hábitat natural, provocando la muerte de animales y la pérdida de biodiversidad. Especies menos móviles, como invertebrados y crías de aves o mamíferos, son especialmente vulnerables a estos incendios.

Además, los incendios forestales liberan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, contribuyendo al cambio climático. Este fenómeno puede alterar la biodiversidad y convertir sumideros de carbono, como las selvas tropicales, en fuentes de carbono.

1.2.2 Impacto Económico y Social

Los incendios forestales crean una carga económica considerable para los países afectados, generando pérdidas directas e indirectas en distintos sectores. Estas pérdidas incluyen los costes de extinción, la pérdida de infraestructuras, el daño a tierras agrícolas y forestales, así como la disminución del valor de los recursos naturales. Además, las repercusiones sociales afectan la calidad de vida de las comunidades y pueden generar crisis humanitarias en regiones vulnerables.

Uno de los impactos más evidentes de los incendios forestales es el elevado coste de extinción y control del fuego. Los gobiernos deben invertir en personal y medios especializados, aeronaves (Figura 1-3), vehículos y equipos de protección para mitigar la propagación del fuego.



Figura 1-3 Avión Anfíbio Tipo 1 FOCA [7]

Además, las infraestructuras críticas, como carreteras, redes eléctricas y edificaciones, son fácilmente afectadas por los incendios. La destrucción de estas estructuras no solo implica costes de reparación y reconstrucción, sino que también interrumpe servicios esenciales como el suministro de electricidad y agua potable, afectando tanto a zonas urbanas como rurales.

Otro sector fuertemente perjudicado es la agricultura, donde los incendios pueden arrasar cultivos, pastizales y bosques productivos, reduciendo la producción de alimentos y materiales de madera. La pérdida de suelo fértil debido a la erosión post-incendio agrava aún más el problema, ya que la recuperación de tierras agrícolas puede tardar décadas.

El turismo también se ve seriamente afectado, especialmente en regiones donde la economía depende de parques naturales, reservas ecológicas y actividades al aire libre. La destrucción del paisaje, la contaminación del aire y el miedo a incendios forestales pueden reducir significativamente la afluencia de visitantes, afectando a empresas locales reduciendo sus ingresos.

Desde un punto de vista social, los incendios forestales pueden provocar desplazamientos masivos de población. Las comunidades que habitan en zonas de alto riesgo pueden verse obligadas a evacuar sus hogares, perdiendo bienes materiales y fuentes de sustento. En algunos casos, esto genera crisis humanitarias, ya que las familias desplazadas requieren alojamiento temporal, apoyo económico y asistencia psicológica.

La salud pública también se ve afectada significativamente. La exposición al humo y a las partículas finas generadas por los incendios incrementa el número de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, afectando especialmente a niños, ancianos y personas con afecciones preexistentes.

El estrés y la ansiedad generados por la pérdida de viviendas, medios de vida y seres queridos también tienen repercusiones a largo plazo en la salud mental de las personas afectadas. La incertidumbre ante futuros incendios y la reconstrucción de comunidades devastadas pueden generar efectos psicológicos adversos, requiriendo apoyo emocional.

1.3 Frecuencia y tendencias actuales

Los incendios forestales han aumentado en frecuencia e intensidad en las últimas décadas, afectando grandes extensiones de terreno en todo el mundo. Estos eventos no solo han crecido en número, sino que también han incrementado su severidad debido a cambios en el clima, la acumulación de biomasa inflamable y la expansión de actividades humanas en zonas vulnerables.

A nivel global, se estima que los incendios forestales afectan aproximadamente 370 millones de hectáreas cada año. De esta extensión, aproximadamente el 67% de los incendios ocurren en África, mientras que el resto se distribuye entre América, Asia, Europa y Oceanía. Los incendios en zonas tropicales han sido especialmente preocupantes, ya que han contribuido a una pérdida de 36.000 hectáreas de bosque anuales en las últimas dos décadas, representando el 15% del incremento global en la reducción de cobertura arbórea por incendios [8].

En Europa, la Península Ibérica es una de las regiones más afectadas, donde el clima mediterráneo, caracterizado por veranos secos y temperaturas extremas, facilita la propagación del fuego. Durante 2023, se registraron 89.135 hectáreas quemadas en España (Figura 1-4), lo que representa un aumento significativo con respecto a años anteriores. La media de la última década se sitúa en torno a 103.918 hectáreas anuales, lo que indica una clara tendencia al alza en la afectación del territorio. Además, en 2022 se contabilizaron 60 grandes incendios forestales, definidos como aquellos que abarcan más de 500 hectáreas, situando a ese año entre los más devastadores en la historia reciente del país.



Figura 1-4 Incendio Forestal en España [9]

El cambio climático se ha identificado como uno de los factores clave en la modificación de los patrones de ignición y propagación de los incendios forestales. Las temperaturas globales han experimentado un aumento sostenido, los períodos de sequía se han prolongado y los fenómenos meteorológicos extremos, como olas de calor e incendios simultáneos en distintas regiones, han incrementado la vulnerabilidad de los ecosistemas al fuego. Estas condiciones han llevado a muchos países a revisar y fortalecer sus estrategias de prevención, gestión forestal y mitigación del riesgo, implementando medidas que incluyen el manejo de combustibles vegetales, la restauración de paisajes degradados y el uso de nuevas tecnologías para la detección y combate del fuego.

1.4 Causas principales de los incendios forestales

El origen de los incendios forestales es múltiple y puede atribuirse tanto a causas naturales como a la intervención humana. La comprensión de esta complejidad resulta esencial para desarrollar estrategias de prevención y control.

1.4.1 Causas naturales

Entre las causas naturales, los rayos son uno de los principales agentes desencadenantes, especialmente en zonas boscosas y áreas remotas (Figura 1-5). Una descarga eléctrica de un rayo puede encender focos de combustión en la vegetación, causando incendios de gran extensión. Otras causas naturales menos frecuentes incluyen erupciones volcánicas y la combustión espontánea de materia orgánica, fenómeno que puede ocurrir bajo condiciones extremas de calor y sequedad. Aunque estas causas no pueden ser controladas, su estudio resulta fundamental para anticipar y gestionar los riesgos asociados.



Figura 1-5 Rayo causa incendio forestal en Alberta, Canadá [10]

1.4.2 Causas antropogénicas

Sin embargo, la causa más importante de los incendios forestales hoy en día es la acción humana. La negligencia en el manejo del fuego ya sea en actividades recreativas, agrícolas o industriales, los incendios intencionados y los cambios en el uso del suelo son responsables de una gran proporción de los incidentes (Figura 1-6). La expansión de áreas urbanas y la mala gestión de las zonas forestales empeoran aún más el problema. Además, la falta de mantenimiento de infraestructuras y la mala planificación territorial pueden facilitar la propagación de incendios a gran escala.



Figura 1-6 Cigarrillo como foco de incendio forestal [11]

El impacto del cambio climático actúa como un catalizador en este contexto. El incremento de las temperaturas y la prolongación de los periodos de sequía crean un ambiente propicio para la ignición y el avance del fuego, lo que se traduce en incendios más intensos y difíciles de controlar. En muchos

casos, se observa una sinergia entre las causas naturales y antropogénicas, en la que la acción humana genera condiciones que, combinadas con eventos naturales, dan lugar a incendios devastadores.

1.5 Justificación del estudio y objetivos del TFG

El deterioro del suelo tras un incendio forestal es un problema importante que afecta a la capacidad de recuperación natural de los ecosistemas. La pérdida de la vegetación, la alteración de la estructura del suelo y la reducción de la disponibilidad de nutrientes esenciales impiden el restablecimiento de procesos ecológicos fundamentales. Sin una intervención adecuada, los suelos afectados pueden sufrir un deterioro irreversible que conduce a la erosión y, en casos extremos, a la desertificación.

Debido a este problema, la revegetación es considerada una necesidad de alta relevancia. La incorporación de técnicas innovadoras en la restauración de suelos quemados se convierte en una vía prometedora para mitigar los efectos negativos de los incendios. En este sentido, la encapsulación de nutrientes surge como una metodología que permite una liberación controlada y gradual de los nutrientes esenciales en el suelo, optimizando su absorción por parte de la vegetación y reduciendo las pérdidas por lixiviación. Esta técnica no solo favorece la regeneración de la cubierta vegetal, sino que además mejora la estructura y la fertilidad del suelo de forma sostenible.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar la eficacia de la encapsulación de nutrientes en la revegetación de suelos afectados por incendios forestales. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la composición y las características del suelo post-incendio: realizar una evaluación de los cambios fisicoquímicos inducidos por el fuego, prestando especial atención a la pérdida de nutrientes esenciales.
- Evaluar el crecimiento y desarrollo de la vegetación: observar la evolución de la cobertura vegetal en parcelas tratadas con nutrientes encapsulados utilizando ensayos de laboratorio.

Esta investigación pretende aportar conocimientos que puedan orientar futuras estrategias de rehabilitación ambiental, contribuyendo al desarrollo de técnicas sostenibles y eficientes para la recuperación de ecosistemas degradados. La implementación de métodos innovadores como la encapsulación de nutrientes tiene el potencial de transformar las prácticas actuales en la gestión de suelos post-incendio, reduciendo el impacto económico y social asociado a estos eventos y promoviendo la resiliencia de los paisajes naturales.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción del estado del arte

En este trabajo de fin de grado (TFG), el estado del arte pretende analizar el impacto de los incendios forestales en el suelo, las estrategias tradicionales de restauración y el potencial de la encapsulación de nutrientes como solución innovadora en la recuperación de suelos degradados.

Investigar sobre el deterioro del suelo tras un incendio forestal cobra una gran importancia debido al aumento de la frecuencia e intensidad con la que se están produciendo en estos tiempos. España es uno de los países europeos más afectados por estos incendios, con una superficie quemada promedio de alrededor de 100.000 hectáreas al año en la última década [12]. La encapsulación de nutrientes surge como una estrategia prometedora que puede llegar a mejorar la restauración del suelo afectado por los incendios, proporcionando una liberación controlada de nutrientes. Su aplicación en suelos quemados es aún un campo emergente, es por esto por lo que surge la necesidad de revisar la literatura existente sobre el impacto del fuego en el suelo y las técnicas de restauración disponibles.

Este TFG parte de la premisa de que la recuperación del suelo tras un incendio forestal es un desafío clave en la conservación de los ecosistemas afectados. Las técnicas convencionales de restauración, como la aplicación de fertilizantes convencionales o la revegetación asistida, presentan limitaciones, especialmente en términos de eficiencia en la retención de nutrientes y su impacto ambiental.

La encapsulación de nutrientes ha demostrado ser una alternativa viable en la agricultura y la mejora de suelos degradados, pero su aplicación específica en suelos quemados no ha sido extensamente estudiada. Esto muestra un vacío de conocimiento que este trabajo busca tratar.

2.2 Impacto de los incendios forestales en el suelo y su regeneración

Los incendios forestales son una de las alteraciones ecológicas más graves que afectan a los ecosistemas terrestres. El fuego no solo consume la cubierta vegetal, sino que también provoca cambios significativos en las propiedades del suelo. Estas alteraciones afectan su estructura, su composición química y su microbiología, lo cual puede comprometer la regeneración natural del ecosistema y aumentar la vulnerabilidad del suelo a procesos erosivos.

2.2.1 Transformaciones en el suelo post-incendio

Los cambios que experimenta el suelo tras un incendio varían según la severidad y duración del fuego. Estas alteraciones pueden ser temporales, con una recuperación en el corto o mediano plazo, o permanentes, si las condiciones del suelo y el clima impiden su regeneración natural.

Los efectos de los incendios varían en función de la temperatura alcanzada y el tiempo de exposición del suelo al fuego. Generalmente, se pueden clasificar en incendios de baja, media y alta intensidad:

- Incendios de baja intensidad: Afectan principalmente a la hojarasca y la materia orgánica superficial sin llegar a modificar significativamente la estructura del suelo. La temperatura del suelo rara vez supera los 200 °C, lo que permite que la microbiota y la vegetación se recuperen rápidamente en pocos meses. La materia orgánica del suelo permanece relativamente intacta, y la infiltración de agua no se ve afectada de manera considerable. Sin embargo, la capa superficial de hojarasca puede perderse, lo que deja el suelo expuesto a la erosión en los primeros meses tras el incendio [13].
- Incendios de media intensidad: En estos eventos, las temperaturas oscilan entre los 200 y 400 °C, afectando tanto a la materia orgánica superficial como a las capas superiores del suelo mineral. Tras este tipo de incendio se observa una reducción en la estabilidad de los agregados del suelo, lo que incrementa su susceptibilidad a la erosión. Además, el calor altera la capacidad de intercambio catiónico del suelo, afectando la disponibilidad de nutrientes esenciales para la recuperación de la vegetación. En algunos casos, se pueden formar costras hidrofóbicas superficiales que dificultan la infiltración del agua y favorecen la escorrentía [14].
- Incendios de alta intensidad: Son los incendios más destructivos para el suelo, alcanzando temperaturas superiores a 500 °C. En estas condiciones, la materia orgánica del suelo se volatiliza completamente, dejando una capa de cenizas rica en sales minerales, pero sin la capacidad de sostener vida microbiana. Se destruyen los agregados del suelo, lo que provoca su compactación y reducción de la porosidad. La hidrofobicidad se intensifica, impidiendo la infiltración del agua y aumentando la erosión hídrica y eólica. Estos incendios pueden tener efectos a largo plazo en la fertilidad del suelo y en su capacidad de regeneración [15].

España cuenta con una gran diversidad de suelos debido a factores climáticos y geológicos. Según el tipo de suelo afectado por los incendios, se pueden observar diferentes variaciones de su composición y estructura:

- Suelos mediterráneos: Los más comunes en la mayor parte del territorio español, especialmente en zonas con clima seco y cálido. Estos suelos suelen ser calcáreos, con texturas franco-arenosas y con bajo contenido de materia orgánica. Tras un incendio, la pérdida de cobertura vegetal y la reducción en la estabilidad de los agregados del suelo favorecen la erosión. La limitada capacidad de retención de agua agrava la recuperación del ecosistema, haciendo que la restauración natural del suelo sea lenta y dependiente de la disponibilidad de precipitaciones estacionales.
- Suelos atlánticos: Encontrados en el norte de España, donde predominan las precipitaciones abundantes y una mayor acumulación de materia orgánica en el suelo. Estos suelos suelen ser ácidos, con una alta capacidad de retención de agua. Sin embargo, tras un incendio, sufren una intensa pérdida de carbono orgánico y nutrientes esenciales, lo que afecta el ciclo del carbono y la fertilidad del suelo. Además, la actividad microbiana disminuye considerablemente, retardando los procesos de descomposición y reciclaje de nutrientes.
- Suelos continentales: Presentes en el interior peninsular, estos suelos tienen un alto contenido en arcillas y limos, lo que les confiere una buena capacidad de retención de agua en condiciones normales. Sin embargo, tras un incendio grave, pueden compactarse y perder porosidad, dificultando la infiltración del agua y promoviendo la escorrentía superficial. Además, la reducción de materia orgánica afecta la estabilidad estructural del suelo, aumentando su vulnerabilidad a la erosión eólica en regiones con poca vegetación tras un incendio.

2.2.2 Alteraciones físicas al suelo tras un incendio

Los incendios forestales provocan cambios físicos significativos en el suelo, afectando a su estructura, porosidad y capacidad de retención de agua. Estos efectos pueden provocar una mayor compactación, la formación de costras hidrofóbicas y un incremento en la susceptibilidad a la erosión.

- Compactación del suelo y pérdida de porosidad:

La compactación del suelo tras un incendio se debe a la pérdida de materia orgánica, la alteración de los agregados del suelo y a la presión que ejerce el material carbonizado. La materia orgánica estabiliza el suelo y favorece la formación de poros y cuando esta se destruye, los agregados pierden su cohesión, aumentando la densidad aparente y reduciendo la macroporosidad del suelo.

Estudios realizados en suelos mediterráneos afectados por incendios de alta intensidad han demostrado que la macroporosidad del suelo puede reducirse hasta en un 40 %, disminuyendo significativamente la capacidad de infiltración del agua y la disponibilidad de oxígeno para las raíces y microorganismos del suelo [16].

- Formación de costras hidrofóbicas:

Tras incendios de moderada intensidad es común la formación de costras hidrofóbicas en el suelo. Durante la combustión de la materia orgánica, se liberan compuestos volátiles hidrofóbicos que se condensan en partículas minerales del suelo, formando una capa superficial repelente al agua.

Las costras varían en espesor dependiendo de la temperatura alcanzada durante el incendio, la cantidad de materia orgánica presente y la textura del suelo. Suelos arenosos y franco-arenosos son más propensos a la formación de hidrofobicidad, mientras que suelos arcillosos tienden a desarrollar menos este fenómeno debido a su mayor capacidad de retención de agua.

Investigaciones llevadas a cabo en el Parque Nacional de Doñana (Figura 2-1) han evidenciado una reducción de hasta un 70 % en la infiltración del agua en suelos afectados por incendios de alta intensidad debido a la presencia de estas costras hidrofóbicas. La escasa infiltración de agua en estos suelos puede provocar la acumulación de humedad en la superficie, favoreciendo la escorrentía superficial y aumentando la erosión. Además, la hidrofobicidad puede dificultar la germinación de semillas, lo que compromete la restauración de la cubierta vegetal tras los incendios [17].



Figura 2-1 Dr. Jiménez Morillo (izquierda) y Dr. Clemente Salas (derecha) en el parque nacional de Doñana realizando estudios del suelo tras incendio forestal [18]

- Erosión acelerada:

La erosión tras un incendio es una de las consecuencias más graves de los incendios forestales, ya que el suelo sin vegetación queda expuesto a la acción del viento y la lluvia. La eliminación de la cubierta vegetal reduce la protección del suelo frente a la acción de las gotas de lluvia, facilitando la disgregación de las partículas y su transporte por escorrentía superficial.

Estudios realizados en la Sierra de Gredos han documentado que la pérdida de suelo se multiplicó por tres en el primer año tras los incendios, debido a la combinación de escorrentía y erosión por el viento. La erosión causada por el agua es particularmente severa en pendientes pronunciadas, donde la escorrentía adquiere mayor velocidad y capacidad de arrastre. En estos terrenos, se pueden formar cárcavas y barrancos, aumentando la degradación del paisaje y la pérdida de suelo fértil.

La erosión debido al viento también puede desempeñar un papel importante en la degradación del suelo post-incendio, especialmente en zonas áridas y semiáridas. La pérdida de la cubierta vegetal expone las partículas finas del suelo a la acción del viento, lo que puede resultar en la pérdida de nutrientes esenciales y en la reducción de la capacidad del suelo para sostener el crecimiento de nuevas plantas [19].

2.2.3 Cambios químicos en el suelo

Los incendios afectan a la composición química del suelo modificando la disponibilidad de nutrientes, alterando la estructura mineral del suelo y generando cambios en el pH. Según la intensidad del fuego y la composición del suelo previo al incendio, estos cambios pueden ser temporales o prolongarse durante años, afectando la regeneración natural de la vegetación y la fertilidad del suelo.

- Pérdida de materia orgánica y nutrientes:

La materia orgánica del suelo es un componente fundamental para su fertilidad. Esta materia está compuesta por residuos vegetales y microorganismos en diferentes estados de descomposición, y desempeña un papel crucial en la retención de nutrientes, la estructura del suelo y la regulación de la humedad.

Al producirse un incendio, las altas temperaturas pueden provocar la combustión total o parcial de la materia orgánica, generando una pérdida significativa de carbono y otros elementos esenciales para la fertilidad del suelo.

Entre los nutrientes más afectados por los incendios se encuentran el nitrógeno, el fósforo y el potasio:

- Nitrógeno (N): Es uno de los nutrientes más volátiles y susceptibles a la combustión. En incendios de alta intensidad, se ha documentado que hasta el 80 % del nitrógeno presente en la materia orgánica se pierde en forma de óxidos de nitrógeno y amoníaco, reduciendo drásticamente la fertilidad del suelo. Esta pérdida tiene consecuencias graves, ya que el nitrógeno es fundamental para el crecimiento de las plantas y su recuperación.
- Fósforo (P): Aunque el fósforo es menos volátil que el nitrógeno, su disponibilidad también puede verse afectada. En incendios de alta intensidad, el fósforo presente en la materia orgánica se convierte en formas menos disponibles para las plantas, afectando la recuperación de la vegetación.
- Potasio (K): Este nutriente es más resistente a la volatilización y, en muchos casos, su concentración en el suelo puede incluso aumentar después del incendio debido a la acumulación de cenizas. Sin embargo, su disponibilidad a largo plazo depende de las lluvias, ya que puede ser fácilmente lixiviado y perdido en las capas más profundas del suelo.

La severidad de la pérdida de nutrientes varía en función de la temperatura alcanzada en el suelo durante el incendio. Estudios previos han demostrado que a temperaturas entre 200 y 300 °C, la mayoría de los microorganismos y parte de la materia orgánica son destruidos, pero algunos nutrientes aún

permanecen disponibles. Sin embargo, cuando la temperatura supera los 500 °C, se produce una alteración significativa de la estructura química del suelo, reduciendo la disponibilidad de nutrientes esenciales para la regeneración vegetal [20].

- Alteraciones en el pH:

El pH del suelo es un factor muy relevante en la disponibilidad de nutrientes. Los incendios provocan cambios en el pH del suelo debido a la combustión de la materia orgánica y la acumulación de cenizas [21].

Uno de los efectos más comunes de los incendios forestales es un aumento temporal del pH del suelo. La combustión de biomasa y materia orgánica genera una acumulación de óxidos de calcio, magnesio y potasio en forma de cenizas, lo que eleva la alcalinidad del suelo. Investigaciones realizadas en suelos mediterráneos han demostrado que, tras incendios de alta intensidad, el pH del suelo puede aumentar entre 0.5 y 2 unidades en la escala de pH, dependiendo de la cantidad de cenizas depositadas [22].

Este aumento en la alcalinidad del suelo puede favorecer temporalmente la disponibilidad de algunos nutrientes, como el fósforo y el calcio. Sin embargo, un pH demasiado elevado puede afectar negativamente la solubilidad de micronutrientes esenciales como el hierro, el manganeso y el zinc, dificultando su absorción por parte de las plantas y ralentizando la regeneración del ecosistema.

La reducción del pH puede dificultar la recuperación de la vegetación, ya que algunas especies son sensibles a la acidez y requieren condiciones más neutras para su establecimiento y crecimiento [23].

Los cambios en el pH del suelo afectan directamente la regeneración de la cubierta vegetal y la actividad microbiana. Para hacer frente a estos efectos, se han desarrollado diversas estrategias de restauración del suelo, como la aplicación de enmiendas orgánicas (biocarbón, compost) y la revegetación con especies adaptadas a condiciones de acidez o alcalinidad elevadas.

El biocarbón ha demostrado ser una herramienta efectiva para estabilizar el pH del suelo tras incendios, ya que ayuda a retener nutrientes esenciales y mejora la capacidad de intercambio catiónico, favoreciendo el restablecimiento de la fertilidad del suelo (Figura 2-2). Además, la adición de materia orgánica favorece la recuperación de la microbiota del suelo, permitiendo una recolonización más rápida de microorganismos esenciales para la restauración del ecosistema.



Figura 2-2 Biocarbón como estabilizador del pH del suelo [24]

2.2.4 Impacto en la biología del suelo

Los incendios forestales tienen un impacto significativo en la biología del suelo. La exposición a altas temperaturas puede eliminar gran parte de la microbiota del suelo, afectando a procesos clave como la descomposición de la materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la interacción simbiótica entre microorganismos y plantas. Dependiendo de la intensidad del fuego y las condiciones posteriores al incendio, la recuperación de la comunidad microbiana puede llevar desde algunos meses hasta más de una década.

- Reducción de microorganismos y biodiversidad edáfica:

Los microorganismos del suelo desempeñan un papel fundamental en la fertilidad y estabilidad de los ecosistemas facilitando la mineralización de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica y la regulación de los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo, los incendios forestales generan un aumento drástico de la temperatura en el suelo, lo que provoca la destrucción de gran parte de la comunidad microbiana [25].

Se ha documentado que temperaturas superiores a 200 °C pueden eliminar hasta el 90 % de la microbiota del suelo, afectando a bacterias y hongos que desempeñan funciones esenciales en la recuperación del ecosistema. En incendios de alta intensidad, donde la temperatura puede superar los 500 °C, la destrucción microbiana es casi total en la capa superficial del suelo, lo que genera una pérdida significativa en la biodiversidad edáfica [26].

En incendios de baja intensidad, algunas esporas de hongos y bacterias pueden sobrevivir en las capas más profundas del suelo, permitiendo una recuperación más rápida de la microbiota. Sin embargo, en incendios de alta intensidad, la comunidad microbiana puede tardar varios años en restablecerse completamente.

- Recuperación lenta de la actividad biológica:

La restauración de la microbiota del suelo tras un incendio es un proceso complejo que depende de múltiples factores, incluyendo la disponibilidad de materia orgánica, la humedad del suelo y la presencia de microorganismos sobrevivientes.

Estudios en suelos mediterráneos han demostrado que, tras incendios graves, la actividad microbiana puede tardar entre 5 y 10 años en recuperarse completamente, dependiendo de las condiciones ambientales y de las estrategias de restauración aplicadas.

Las principales razones de la lenta recuperación biológica son [27]:

- Escasez de materia orgánica: La combustión de la materia orgánica hace que se reduzca la fuente de energía para los microorganismos del suelo, afectando negativamente su proliferación.
- Alteraciones en el pH del suelo: Como se ha explicado en la sección anterior, el aumento del pH tras un incendio puede afectar la disponibilidad de nutrientes y la reactivación de microorganismos sensibles a cambios en la acidez del suelo.
- Pérdida de estructura del suelo: La compactación y la formación de costras hidrofóbicas dificultan la infiltración de agua y la aireación del suelo, condiciones esenciales para la recuperación microbiana.

Como respuesta a estos cambios, se han desarrollado diversas estrategias de restauración del suelo, destacando las siguientes:

- Aplicación de materia orgánica: La adición de compost y biocarbón favorece el restablecimiento de microorganismos beneficiosos y mejora la fertilidad del suelo.
- Reintroducción de microorganismos: En algunos estudios se ha propuesto la inoculación de bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos para restaurar las funciones del suelo y mejorar la resiliencia de la vegetación.

- Revegetación asistida: La siembra de especies adaptadas a condiciones post-incendio puede favorecer la colonización microbiana, ya que las raíces de las plantas interactúan con bacterias y hongos, promoviendo la recuperación del ecosistema edáfico.

2.3 Estrategias tradicionales de restauración de suelos quemados

La restauración del suelo tras un incendio es fundamental no solo para restablecer su fertilidad, sino también para evitar la desertificación y la pérdida de biodiversidad en las áreas afectadas.

- Importancia de la restauración de suelos:

Los incendios forestales han experimentado un aumento tanto en frecuencia como en intensidad en muchas regiones del mundo. En España, por ejemplo, las zonas mediterráneas sufren incendios recurrentes que afectan amplias superficies de bosque y matorral, poniendo en riesgo la estabilidad de los ecosistemas. La ausencia de una estrategia de restauración adecuada puede derivar en la pérdida de la capacidad de los suelos para regenerarse provocando la pérdida de biodiversidad y casos de erosión severa.

Los principales objetivos de la restauración del suelo son:

- Reducir la erosión y la pérdida de suelo fértil.
- Restaurar la fertilidad y la estructura del suelo.
- Recuperar la microbiota del suelo.
- Facilitar la regeneración de la vegetación.

- Enfoques principales en la restauración de suelos quemados:

Las estrategias tradicionales de restauración de suelos quemados se clasifican en dos grandes enfoques: la regeneración natural (restauración pasiva) y la intervención humana mediante técnicas de restauración activa.

2.3.1 Técnicas de restauración pasiva y activa

- Restauración pasiva:

La restauración pasiva se basa en la capacidad natural del ecosistema para recuperarse tras un incendio sin intervención directa del ser humano. Este enfoque cobra importancia en áreas donde el fuego no ha causado una degradación grave del suelo y donde existen mecanismos naturales que favorecen la regeneración de la vegetación y la microbiota edáfica [28].

A pesar de sus ventajas, como su bajo coste y la baja intervención humana, la restauración pasiva no siempre es una opción viable, especialmente en suelos gravemente degradados que presentan las siguientes limitaciones:

- Erosión severa.
- Formación de costras hidrofóbicas.
- Baja disponibilidad de semillas.
- Competencia de especies invasoras.

- Restauración activa:

Cuando la restauración pasiva no es viable, es necesario implementar estrategias de restauración activa que ayuden a acelerar la recuperación del suelo y reducir la degradación del mismo. La restauración activa implica la aplicación de técnicas para mejorar la fertilidad del suelo, estabilizar su estructura y facilitar la regeneración de la vegetación.

De entre las distintas técnicas de restauración activa existentes, las siguientes son las más populares:

- Uso de barreras físicas para controlar la erosión y reducir la escorrentía superficial evitando la pérdida de suelo fértil.
- Uso de compost y biocarbón para reponer la materia orgánica y mejorar la fertilidad del suelo.
- Aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosforados para acelerar el crecimiento de la vegetación en suelos con bajos niveles de nutrientes.
- Uso de biofertilizantes y microorganismos beneficiosos para restaurar la microbiota del suelo y mejorar la disponibilidad de nutrientes.
- Siembra de especies pioneras resistentes a condiciones post-incendio para estabilizar el suelo y reducir la erosión.
- Plantación de árboles y arbustos en áreas con baja capacidad de regeneración natural (Figura 2-3).
- Uso de especies autóctonas adaptadas a la regeneración post-incendio para favorecer la recuperación del ecosistema.
- Inoculación de hongos micorrícicos y bacterias fijadoras de nitrógeno para mejorar la estructura del suelo y acelerar la restauración biológica.
- Aplicación de lixiviados de compost y bioestimulantes para favorecer el restablecimiento de comunidades microbianas beneficiosas.

De entre los numerosos beneficios de la restauración activa se encuentran la reducción de la erosión y pérdida de suelo, la aceleración de la recuperación de la vegetación, la restauración de la fertilidad del suelo y la mayor resiliencia frente a futuros incendios [29].



Figura 2-3 Reforestación que se lleva a cabo en el parque regional de Calblanque [30]

2.3.2 Uso de fertilizantes convencionales en la recuperación del suelo

Para contrarrestar la pérdida de nutrientes tras los incendios, se han utilizado tradicionalmente fertilizantes convencionales como fuente rápida de nutrientes (Figura 2-4). Sin embargo, su eficacia y sostenibilidad han sido objeto de debate ya que, si bien pueden favorecer la recuperación vegetal en el corto plazo, también pueden generar problemas ambientales y afectar la dinámica del ecosistema edáfico.



Figura 2-4 Fertilizantes para recuperación del suelo [31]

El uso de fertilizantes inorgánicos en suelos quemados se ha promovido debido a su capacidad para reponer los nutrientes esenciales perdidos por la volatilización y la lixiviación post-incendio.

De entre las principales ventajas de su uso encontramos las siguientes:

- Aporte inmediato de nutrientes.
- Estimulación del crecimiento vegetal.
- Mejora de la productividad del suelo.

A pesar de sus beneficios inmediatos, el uso de fertilizantes inorgánicos tiene diversas limitaciones y riesgos ambientales como la contaminación de acuíferos debido a lixiviación, la alteración de la microbiota del suelo y su efecto limitado en suelos seriamente degradados.

Dadas estas limitaciones de los fertilizantes químicos, se han explorado diversas alternativas más sostenibles para la recuperación de suelos quemados como el uso de enmiendas orgánicas mediante la aplicación de compost o estiércol, el uso de biofertilizantes y microorganismos beneficiosos y la liberación controlada de nutrientes mediante tecnologías de encapsulación de nutrientes [32].

2.3.3 Técnicas de bioingeniería para la recuperación del suelo

La bioingeniería combina principios de la ingeniería y la ecología diseñando soluciones para la restauración de suelos degradados. Dentro del contexto de la recuperación de suelos quemados, las técnicas de bioingeniería buscan estabilizar el suelo, reducir la erosión y mejorar su fertilidad, promoviendo la regeneración natural del ecosistema. Estas estrategias han demostrado ser eficaces en la restauración de terrenos afectados por incendios, permitiendo la recuperación del equilibrio ecológico sin recurrir a métodos químicos agresivos o costosos.

A lo largo de los años, diversas estrategias de bioingeniería han sido utilizadas para mejorar la recuperación de suelos afectados por incendios destacando las siguientes:

- Uso de mulch y cobertura vegetal:

El mulch consiste en la aplicación de una capa protectora de material orgánico o inorgánico sobre la superficie del suelo (Figura 2-5). Esta técnica reduce la evaporación, protege el suelo de la erosión y mejora la infiltración de agua.

Estudios han demostrado que la aplicación de mulch en suelos post-incendio puede reducir la erosión en más de un 60 % y mejorar significativamente la retención de humedad, favoreciendo la regeneración de la vegetación [33].



Figura 2-5 Parcela Tratada con mulch de paja en el incendio de Cercedo 2006 [34]

- Construcción de barreras contra la erosión:

Las barreras contra la erosión son estructuras diseñadas para frenar el movimiento del suelo y evitar la pérdida de sedimentos (Figura 2-6). Estas barreras pueden construirse con materiales naturales, como troncos, piedras o mallas biodegradables, y se instalan en zonas de fuerte pendiente o en áreas con alto riesgo de erosión.

En un estudio realizado en España, la instalación de barreras de troncos en suelos afectados por incendios redujo la pérdida de suelo en un 70 %, lo que demuestra su efectividad para estabilizar el terreno y favorecer la recuperación vegetal [35].



Figura 2-6 Barreras de tela biodegradable para prevenir la erosión del suelo [36]

- Aplicación de materia orgánica y enmiendas al suelo:

La incorporación de materia orgánica es una técnica imprescindible en la bioingeniería para la recuperación de suelos quemados. Las enmiendas orgánicas ayudan a mejorar la estructura del suelo, aumentar su capacidad de retención de agua y favorecer la actividad microbiana.

Está documentado que la aplicación de biocarbón en suelos quemados aumenta la capacidad de retención de agua en un 30 % y mejora la disponibilidad de nutrientes para la regeneración de la vegetación [37].

2.3.4 Técnicas de revegetación para la estabilización del suelo

La revegetación asistida es una estrategia fundamental para la recuperación de suelos quemados. Su objetivo es acelerar el establecimiento de una cubierta vegetal que proteja el suelo y mejore sus propiedades fisicoquímicas.

Estudios en la península ibérica han demostrado que la revegetación con especies autóctonas reduce la erosión en un 80 % y mejora la fertilidad del suelo en un periodo de 3 a 5 años [38].

En algunos casos, la vegetación puede recuperarse de forma natural a partir del banco de semillas del suelo o del rebrote de plantas resistentes al fuego. Esta estrategia es más efectiva en áreas donde:

- El banco de semillas no ha sido destruido por el fuego.
- Las especies presentes tienen mecanismos de rebrote, como encinas, alcornoques o pinos piñoneros.
- Las condiciones climáticas favorecen la germinación y el crecimiento de plántulas.

Sin embargo, la regeneración natural puede ser lenta y, en suelos degradados con pérdida severa de materia orgánica, puede no ser suficiente para restaurar la cubierta vegetal en un tiempo adecuado.

Como respuesta a este último hecho, la siembra directa es una técnica ampliamente utilizada para restaurar áreas quemadas consistente en la dispersión de semillas de especies nativas y adaptadas a las condiciones post-incendio. Esta estrategia puede realizarse de manera manual o mecánica y es especialmente efectiva en zonas donde la regeneración natural es limitada. Sus principales ventajas son:

- Bajo coste en comparación con la plantación de plántulas.
- Capacidad para cubrir grandes extensiones de terreno rápidamente.
- Facilidad para seleccionar especies resistentes a condiciones adversas.

La eficacia de esta técnica depende de factores como la calidad de las semillas, la disponibilidad de agua y la presencia de suelo fértil. En algunos casos, se pueden aplicar tratamientos previos a las semillas, como la escarificación o la estratificación, para mejorar sus tasas de germinación.

En áreas donde la regeneración natural es insuficiente y la siembra directa no garantiza una cobertura vegetal estable, la plantación de árboles y arbustos puede ser la mejor opción utilizando plantas cultivadas en viveros que son trasplantadas al terreno afectado.

La reforestación requiere planificación y monitoreo, ya que la supervivencia de las plántulas puede verse afectada por factores como la sequía, la compactación del suelo y la competencia con especies invasoras.

Otra técnica prometedora es la hidrosiembra, la cual consiste en la aplicación de una mezcla de semillas, fertilizantes, polímeros y mulch mediante un chorro de agua a presión. Es especialmente útil en terrenos con alta pendiente o de difícil acceso, donde la siembra manual sería poco eficiente. De entre sus beneficios destacan los siguientes:

- Distribución homogénea de semillas en grandes áreas.
- Protección contra la erosión gracias a la capa de mulch aplicada.
- Mejora en la retención de humedad, favoreciendo la germinación.

Estudios en la Península Ibérica han demostrado que la hidrosiembra puede mejorar la cobertura vegetal en hasta un 50 % en los primeros años tras un incendio [39] (Figura2-7).



Figura 2-7 Talud tratado con matas orgánicas e hidrosiembra [40]

En España, diversos proyectos han demostrado la efectividad de la reforestación y la revegetación asistida en la restauración de áreas quemadas:

- Reforestación en el Parque Natural de Cazorla: Uso de encinas y alcornoques para recuperar áreas quemadas en Andalucía [41] (Figura 2-8).



Figura 2-8 Voluntariado ambiental en el paraje del Puerto de las Palomas [42]

- Restauración post-incendio en Doñana: Siembra de especies autóctonas y aplicación de mulch para estabilizar el suelo [43] (Figura 2-9).



Figura 2-9 Voluntarios para la replantación en zona afectada por incendio en el Parque de Doñana [44]

- Proyectos de restauración en Portugal y Grecia: Implementación de hidrosiembra y barreras contra la erosión en terrenos de alta pendiente.

2.4 Encapsulación de nutrientes como estrategia innovadora para la restauración del suelo

Dentro de la complejidad de la restauración de suelos tras un incendio forestal, la encapsulación de nutrientes ha surgido como una técnica prometedora para la liberación controlada de elementos esenciales en suelos degradados. Esta tecnología permite aumentar la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas, reducir la lixiviación y mitigar el impacto ambiental de los fertilizantes convencionales.

2.4.1 Principios de la encapsulación de nutrientes

La encapsulación de nutrientes es una tecnología innovadora que consiste en la incorporación de fertilizantes dentro de una cubierta protectora que regula su liberación en el tiempo. A diferencia de los fertilizantes convencionales, que se disuelven rápidamente en el suelo, los fertilizantes encapsulados se diseñan para liberar nutrientes de manera controlada y prolongada, asegurando de esta forma que las plantas los absorban de manera más eficiente y reduciendo la lixiviación de elementos esenciales hacia capas más profundas del suelo o cuerpos de agua cercanos.

Este método se ha desarrollado como una alternativa sostenible para mejorar la recuperación de suelos degradados, incluidos aquellos afectados por incendios forestales. La encapsulación de nutrientes permite adaptar la fertilización a las necesidades reales de las plantas, optimizando la absorción de elementos como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), fundamentales para la regeneración del ecosistema post-incendio.

Los fertilizantes convencionales suelen aplicarse en forma de sales solubles o gránulos que se disuelven rápidamente al entrar en contacto con la humedad del suelo. Esto genera un suministro inmediato de nutrientes a la vegetación, pero también conlleva problemas como:

- Pérdidas por lixiviación.
- Liberación no sincronizada con la demanda vegetal.
- Impacto en la microbiota del suelo.

Sin embargo, los fertilizantes encapsulados ofrecen múltiples beneficios:

- Liberación gradual y controlada de los nutrientes, sincronizada con el crecimiento de las plantas.
- Menor riesgo de lixiviación, protegiendo la calidad del agua y reduciendo la contaminación ambiental.
- Optimización del uso de fertilizantes.

Los fertilizantes encapsulados pueden liberar nutrientes en el suelo a través de distintos mecanismos, dependiendo del material utilizado en la matriz encapsulante y las condiciones ambientales:

- Difusión a través de la cápsula: Mediante este mecanismo, la capa externa de la cápsula permite el paso progresivo de agua al interior del fertilizante, disolviendo los nutrientes y liberándolos lentamente en el suelo. La velocidad de difusión dependerá del espesor y composición de la cápsula.
- Biodegradación de la matriz encapsulante: En el caso de materiales biodegradables como biopolímeros naturales, la matriz encapsulante se descompone gradualmente por la acción de microorganismos del suelo, liberando los nutrientes de manera progresiva. Este proceso favorece la recuperación de la microbiota del suelo, ya que proporciona una fuente de carbono orgánico adicional.
- Liberación controlada por estímulos ambientales: Existen fertilizantes encapsulados que están diseñados para responder a factores ambientales como la humedad, temperatura o pH del suelo, de forma que los nutrientes solo se liberan cuando las condiciones del suelo son óptimas para su absorción por las plantas, maximizando la eficiencia del fertilizante y minimizando pérdidas.
- Ósmosis y presión osmótica: En ciertas formulaciones, los nutrientes son liberados mediante un proceso osmótico que regula su difusión a través de la cápsula de manera progresiva. Este sistema es especialmente útil en suelos áridos o con disponibilidad irregular de agua, donde un suministro constante de nutrientes es crucial para la regeneración vegetal.

La encapsulación de nutrientes presenta ventajas significativas frente a la fertilización convencional:

- Favorece la regeneración de la vegetación autóctona al proporcionar un suministro constante de nutrientes adaptado al crecimiento de especies resistentes al fuego.
- Reduce la lixiviación de nitrógeno y fósforo, evitando la contaminación de aguas subterráneas en zonas afectadas por incendios.
- Optimiza la restauración de la microbiota del suelo, al proporcionar un ambiente favorable para el crecimiento de bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos esenciales para la recuperación del ecosistema post-incendio.

2.4.2 Tipos de materiales utilizados en la encapsulación

La efectividad de los fertilizantes encapsulados depende en gran medida del material utilizado para la cubierta de la cápsula. La elección del material es crucial, ya que influye en la biodegradabilidad, la liberación controlada de nutrientes y el impacto ambiental del fertilizante (Tabla 2-1). En los últimos años, la investigación en este campo ha desarrollado distintos tipos de materiales con características específicas para la restauración del suelo post-incendio.

- Biopolímeros y compuestos naturales:

Los biopolímeros son materiales biodegradables derivados de fuentes naturales, como polisacáridos, proteínas y lípidos. Son ampliamente utilizados en la encapsulación de nutrientes debido a su compatibilidad con el medio ambiente y su capacidad para regular la liberación de los fertilizantes [45].

Ejemplos de biopolímeros usados en la encapsulación de nutrientes pueden ser:

- Quitosano: Un polisacárido obtenido de la quitina presente en crustáceos y hongos.

- Alginatos: Derivados de algas marinas.
- Celulosa y derivados: Empleados como recubrimientos biodegradables para mejorar la absorción de nutrientes sin generar residuos contaminantes.
- Zeolitas y arcillas como agentes de liberación lenta:

Las zeolitas y arcillas son materiales minerales porosos con alta capacidad de intercambio iónico, lo que les permite retener y liberar nutrientes de forma progresiva en función de la demanda de las plantas.

Algunas propiedades de este tipo de materiales son las siguientes:

- Alta capacidad de retención de agua.
- Liberación controlada de nutrientes.
- Mejora en la estructura del suelo.
- Materiales sintéticos para la encapsulación:

Los polímeros sintéticos son ampliamente utilizados en la industria agrícola para la fabricación de fertilizantes de liberación controlada. Sin embargo, su impacto ambiental es una preocupación importante, ya que muchos de estos materiales no son biodegradables y pueden generar acumulación de microplásticos en el suelo.

Ejemplos de polímeros sintéticos utilizados en la encapsulación de nutrientes pueden ser:

- Poliuretano: Utilizado en recubrimientos de fertilizantes de liberación lenta, pero con desventajas en términos de degradabilidad ambiental.
- Polietileno y polipropileno: Se emplean en microcápsulas de fertilizantes, aunque su persistencia en el medio ambiente limita su uso en estrategias sostenibles.
- Poliésteres biodegradables: Como el ácido poliláctico (PLA), que se están desarrollando como alternativas a los plásticos convencionales en la encapsulación de nutrientes.

A pesar de que los materiales sintéticos han demostrado ser eficaces en la liberación controlada de fertilizantes, hoy en día se están buscando alternativas biodegradables para reducir su impacto ambiental y mejorar su aplicación en la restauración de suelos [46].

Material	Biodegradabilidad	Control de Liberación	Impacto ambiental
Biopolímeros	Alta	Medio-Alto	Bajo
Zeolitas/Arcillas	Media	Alto	Bajo
Polímeros sintéticos	Baja	Muy alto	Alto

Tabla 2-1 Tabla comparativa de materiales para encapsulación

Para la restauración de suelos quemados, la elección del material encapsulante debe considerar:

- Biodegradabilidad: Materiales como los biopolímeros y las zeolitas son preferibles debido a su impacto ambiental reducido.
- Liberación eficiente de nutrientes: Debe ajustarse a las condiciones del suelo y a las necesidades de la vegetación en recuperación.
- Compatibilidad con la microbiota del suelo: Algunos materiales pueden favorecer la regeneración de microorganismos beneficiosos.

En la actualidad, la investigación en encapsulación de nutrientes se está orientando hacia el desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficaces para la restauración de ecosistemas degradados, optimizando la disponibilidad de nutrientes sin comprometer la calidad del suelo a largo plazo.

2.4.3 Aplicación de la encapsulación de nutrientes en el suelo post-incendio

La encapsulación de nutrientes ofrece una alternativa eficiente y sostenible para la restauración de suelos afectados por incendios forestales. La liberación controlada de nutrientes a través de este método permite reducir la lixiviación, mejorar la absorción de fertilizantes por parte de la vegetación y favorecer la regeneración del ecosistema. En suelos degradados, donde la pérdida de materia orgánica y la alteración de la estructura física comprometen la fertilidad, la encapsulación de nutrientes representa una solución prometedora para la restauración ecológica.

Dentro de los beneficios de la encapsulación de nutrientes en suelos quemados destacan los siguientes:

- Mejora en la disponibilidad de nutrientes esenciales:
 - La encapsulación permite mantener un suministro constante y gradual de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), elementos fundamentales para la regeneración de la vegetación.
 - La liberación controlada evita deficiencias o excesos de nutrientes en el suelo, mejorando la eficiencia en la absorción por parte de las plantas.
- Reducción de la lixiviación y pérdida de fertilizantes:
 - La estructura de la cápsula reduce la disolución inmediata del fertilizante, evitando que los nutrientes sean arrastrados por el agua de lluvia.
 - Este mecanismo es particularmente importante en suelos arenosos o degradados, donde la retención de nutrientes suele ser baja.
- Impacto positivo en la regeneración de la microbiota del suelo:
 - La liberación controlada de nutrientes favorece el crecimiento de microorganismos beneficiosos, como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos, fundamentales para la restauración de la fertilidad del suelo.
 - Al evitar concentraciones excesivas de fertilizantes en el suelo, se previene la toxicidad para la microbiota y se fomenta un equilibrio biológico adecuado.
- Promoción de la regeneración vegetal en zonas afectadas por incendios:
 - La encapsulación permite optimizar la absorción de nutrientes por parte de especies vegetales nativas, facilitando su establecimiento y desarrollo.

Múltiples estudios han comprobado la efectividad de la encapsulación de nutrientes en la restauración de suelos de entre los cuales destacan los siguientes:

- Restauración de suelos en la región mediterránea: Un estudio realizado en suelos mediterráneos degradados evidenció que la aplicación de fertilizantes encapsulados mejoró la retención de nitrógeno en un 40 % y redujo la lixiviación en un 50 % en comparación con fertilizantes convencionales.
- Recuperación de ecosistemas forestales en Estados Unidos: Se evaluó el impacto de fertilizantes de liberación controlada en suelos quemados, observándose un incremento del 35 % en la regeneración de la microbiota y un aumento significativo en la biomasa vegetal en comparación con métodos convencionales.
- Aplicación en suelos tropicales afectados por incendios: Investigaciones en suelos tropicales han demostrado que la combinación de fertilizantes encapsulados con enmiendas orgánicas puede

mejorar la retención de humedad y acelerar la recuperación de la vegetación en un 25 % respecto a la fertilización tradicional.

A pesar de que la encapsulación de nutrientes ofrece múltiples ventajas en la restauración de suelos quemados, su efectividad depende de diversos factores:

- Condiciones del suelo.
- Selección del material encapsulante.
- Especies vegetales objetivo.
- Condiciones climáticas.

2.4.4 Evaluación del impacto de la encapsulación en la revegetación

La efectividad de la encapsulación de nutrientes en la restauración del suelo se puede evaluar a través de distintos métodos que permiten medir su impacto en la regeneración vegetal, la fertilidad del suelo y la reducción de la lixiviación de nutrientes. La evaluación de estos parámetros es fundamental para determinar la viabilidad de la encapsulación como estrategia de restauración ecológica en ecosistemas afectados por incendios.

De entre las numerosas pruebas que se pueden hacer para evaluar la efectividad de la encapsulación de nutrientes tenemos:

- Pruebas de germinación y crecimiento vegetal:
 - Ensayos en invernadero y campo: Se comparan tasas de germinación y crecimiento de especies nativas en suelos tratados con fertilizantes encapsulados y convencionales.
 - Medición de biomasa aérea y radicular: Se analiza el desarrollo de la vegetación en términos de altura, número de hojas y expansión del sistema radicular.
 - Evaluación de la tasa de establecimiento de plántulas: Se mide la supervivencia de las plantas en función de la disponibilidad de nutrientes suministrados mediante encapsulación.
- Análisis de nutrientes en el suelo:
 - Determinación de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK): Se cuantifica la concentración de nutrientes en diferentes capas del suelo y su disponibilidad para las plantas.
 - Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Indicador de la capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes esenciales.
 - Dinámica de liberación de nutrientes: Se monitorea la liberación gradual de los fertilizantes encapsulados y su persistencia en el suelo en comparación con fertilizantes convencionales.
- Evaluación de la microbiota del suelo:
 - Diversidad microbiana: Se analiza la composición y abundancia de microorganismos del suelo, incluyendo bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos.
 - Actividad enzimática del suelo: Se mide la presencia de enzimas como la ureasa y la fosfatasa, indicadores de la actividad microbiana y la mineralización de nutrientes.

Distintos estudios han demostrado que la encapsulación de nutrientes puede superar en eficiencia a la fertilización convencional, reduciendo la lixiviación de nitrógeno en más del 50 % y aumentando la tasa de establecimiento de plántulas en un 30 % en comparación con métodos tradicionales de restauración.

A pesar de sus ventajas, la implementación de fertilizantes encapsulados a gran escala en la restauración de suelos post-incendio presenta una serie de desafíos que deben abordarse para garantizar su viabilidad y sostenibilidad:

- Optimización de materiales encapsulantes biodegradables: Se deben desarrollar matrices biodegradables eficientes que minimicen el impacto ambiental y aseguren una liberación controlada de nutrientes.
- Análisis de costes-beneficio: Aunque los fertilizantes encapsulados pueden reducir la necesidad de aplicaciones repetidas, su producción y formulación pueden ser más costosas que los fertilizantes convencionales.
- Adaptación a diferentes tipos de suelos y ecosistemas: Es necesario realizar estudios específicos para determinar la efectividad de la encapsulación en distintos tipos de suelos post-incendio, considerando factores como el pH, la textura y el contenido de materia orgánica.
- Compatibilidad con otras estrategias de restauración: La encapsulación de nutrientes puede complementarse con técnicas como la aplicación de enmiendas orgánicas, la revegetación asistida y la estabilización del suelo con barreras contra la erosión.

En investigaciones recientes, la aplicación de fertilizantes encapsulados en combinación con enmiendas orgánicas ha demostrado mejorar significativamente la estabilidad del suelo y la recuperación de la vegetación en zonas afectadas por incendios.

2.5 Desafíos y futuras líneas de investigación en la restauración de suelos quemados

2.5.1 Limitaciones actuales en la recuperación de suelos post-incendio

Tras un incendio forestal, el suelo experimenta cambios que pueden condicionar la efectividad de cualquier técnica de rehabilitación incluyendo la de fertilización con nutrientes encapsulados.

En primer lugar, existen factores ecológicos que pueden restar eficacia a la encapsulación. Por ejemplo, inmediatamente después del fuego suele producirse un pulso de nutrientes disponibles provenientes de las cenizas (especialmente N y P), lo que puede hacer innecesaria o poco ventajosa la fertilización adicional en el corto plazo.

Además, los suelos quemados suelen presentar hidrofobicidad, lo cual dificulta la infiltración de agua y favorece la pérdida superficial de las cápsulas o nutrientes antes de que cumplan su función. Estas condiciones post-incendio (pH alterado por las cenizas, baja retención hídrica, estructura degradada) complican la restauración mediante encapsulación, pues el suelo puede no proporcionar inicialmente el ambiente óptimo para la liberación controlada de nutrientes.

Desde el punto de vista tecnológico, existen desafíos en la formulación y aplicación de fertilizantes encapsulados en suelos quemados.

Un problema reconocido es el “efecto cola” en muchos fertilizantes de liberación controlada: tras liberar el ~80–85% del nutriente, el restante 15–20% se libera muy lentamente y durante un periodo prolongado. Esto reduce la eficiencia práctica, ya que parte del nutriente puede quedar retenido en la cápsula más allá del periodo crítico de recuperación vegetal.

Igual de preocupante es el “efecto explosión” inicial o liberación demasiado rápida si las cápsulas sufren daños o condiciones extremas (por ejemplo, altas temperaturas de la superficie quemada o lluvias torrenciales posteriores) que rompan su integridad.

Lograr un perfil de liberación adecuado para suelos post-incendio con un aporte inicialmente bajo pero sostenido en el tiempo conforme la vegetación va creciendo requiere ajustar cuidadosamente las propiedades de la cápsula.

Otro desafío técnico es asegurar la degradación completa de la cápsula tras liberar los nutrientes. Tradicionalmente, muchos fertilizantes de liberación lenta usan recubrimientos poliméricos que pueden dejar microplásticos en el suelo si no son biodegradables, un aspecto medioambiental crítico que ha limitado su uso extensivo.

Finalmente, la viabilidad económica y la aplicación a gran escala representan limitaciones prácticas importantes. La fabricación de fertilizantes encapsulados conlleva costes elevados debido a los materiales de recubrimiento y procesos tecnológicos involucrados, encareciendo el producto final respecto a fertilizantes convencionales.

Este elevado coste de producción y estudio dificulta su uso extensivo en las vastas superficies afectadas por incendios forestales, que suelen abarcar cientos o miles de hectáreas. A diferencia de la agricultura intensiva (donde el retorno económico puede justificar inversiones en insumos de liberación controlada), en la restauración ecológica de montes quemados los presupuestos suelen ser limitados y provienen de fondos públicos o programas de conservación, lo que exige soluciones rentables y de fácil implementación.

Incluso si el coste fuera más asequible, surgen retos logísticos como la accesibilidad del terreno (pendientes, zonas remotas) que puede complicar la distribución uniforme de las cápsulas. De este modo se podrían requerir medios aéreos (helicópteros, drones) para esparcir los fertilizantes encapsulados, aumentando el costo operativo.

Todos estos hechos hacen que, actualmente, la encapsulación de nutrientes no sea una herramienta de uso común en restauración post-incendio, a pesar de su potencial. Superar estas limitaciones abaratando materiales, perfeccionando las formulaciones y demostrando su eficacia ecológica es crucial para que esta estrategia se adopte más ampliamente en el futuro.

2.5.2 Nuevas perspectivas en la investigación de suelos post-incendio

A pesar de las limitaciones actuales, diversos avances científicos apuntan a soluciones innovadoras para mejorar la restauración de suelos quemados mediante encapsulación de nutrientes.

Uno de los frentes más prometedores es el desarrollo de nuevos materiales de recubrimiento biodegradables. El objetivo es sustituir polímeros sintéticos persistentes por materiales que se degraden completamente en el medio ambiente tras cumplir su función, eliminando el riesgo de residuos. En esta línea, se investigan polímeros naturales como alginatos, quitosano, almidones y lignina modificada. Por ejemplo, el alginato ha demostrado ser un excelente vehículo: es biodegradable, compatible con el suelo y puede controlar eficazmente la liberación de nutrientes gracias a su capacidad gelificante y de retención de agua. Existen estudios que señalan que materiales compuestos a base de alginato pueden liberar nutrientes de forma sostenida y mejorar la humedad del suelo simultáneamente.

Asimismo, se están explorando recubrimientos híbridos que combinan biodegradabilidad con resistencia inicial, como cápsulas de celulosa bacteriana, polímeros solubles o resinas naturales, que garanticen una liberación controlada sin dejar partículas tóxicas. Estos materiales buscan adaptar la liberación de nutrientes a las condiciones específicas post-incendio.

Otra perspectiva de vanguardia es la aplicación de la nanotecnología para mejorar la liberación controlada de nutrientes en suelos post-incendio. La nanotecnología permite diseñar fertilizantes a escala nanométrica o utilizar nano-materiales como parte de la cápsula dotándoles de propiedades únicas.

Este tipo de formulación nanométrica podría ser muy útil en suelos quemados, aportando nutrientes gradualmente y reduciendo pérdidas por lixiviación en terrenos erosionados.

Asimismo, se investiga la encapsulación de micronutrientes en nano-forma que puedan corregir deficiencias en suelos pobres tras el fuego. La pequeña escala de los nano-fertilizantes ofrece una alta relación superficie/volumen, facilitando la interacción con las partículas del suelo y las raíces, y potencialmente mejorando la eficiencia de uso de nutrientes.

Lejos de considerarse una estrategia aislada, la encapsulación de nutrientes tiende a integrarse con otras tácticas de restauración del suelo en sinergia. Un enfoque combinado puede amplificar los beneficios y mitigar las carencias de cada técnica.

Un ejemplo de esta sinergia es la combinación de biofertilizantes con la revegetación asistida. En lugar de solo proveer nutrientes químicos, se pueden inocular microorganismos beneficiosos (hongos micorrícicos, bacterias fijadoras de nitrógeno) encapsulados junto con nutrientes. Esto protegería a los microorganismos en el hostil ambiente inicial post-fuego y les proporcionaría nutrientes para establecerse.

Por último, las tecnologías de sensores inteligentes y monitoreo digital están encontrando aplicaciones emergentes en la gestión de la fertilización post-incendio.

En el contexto de agricultura de precisión ya se emplean redes de sensores para medir en tiempo real la humedad, pH y niveles de nutrientes del suelo, pudiéndose adaptar estas a proyectos de restauración ecológica. Una posibilidad es utilizar sensores in situ para monitorear la liberación de nutrientes desde las cápsulas enterradas o esparcidas en el terreno.

Asimismo, se exploran recubrimientos “inteligentes” en los fertilizantes: por ejemplo, un grupo de investigación desarrolló recubrimientos con biosensores de ADN (aptámeros) que responden a señales químicas emitidas por las raíces de las plantas para desencadenar la liberación de nitrógeno solo cuando el vegetal lo “solicita” activamente. Este tipo de Smart fertilizer con capacidad sensora evita la liberación prematura de nutrientes cuando el suelo ya está cargado (minimizando pérdidas por lavado que terminan contaminando aguas y causando eutrofización). Los resultados iniciales en laboratorio y vivero con estos fertilizantes de liberación modulada por señales biológicas han sido positivos, demostrando que es factible vincular la dinámica de la cápsula a las necesidades de la biota.

A la par, el uso de drones y teledetección ofrece nuevas vías para el monitoreo de la recuperación del suelo y la vegetación. Drones equipados con cámaras multispectrales pueden evaluar el reverdecimiento y estado nutricional de la cobertura vegetal tras aplicar fertilizantes encapsulados, sirviendo como indicadores indirectos de si la liberación está siendo adecuada.

Aunque estos enfoques de sensorización inteligente se hallan en etapas experimentales, apuntan a un manejo adaptativo de la restauración: poder ajustar en tiempo real las estrategias (dosis, ubicación, frecuencia de aplicación de nutrientes encapsulados) en función de datos de campo sobre la recuperación edáfica y vegetal. Esto representaría un salto cualitativo, haciendo la fertilización post-incendio más eficiente, dirigida y sostenible, acorde con los principios de la restauración ecológica informada por la ciencia.

2.5.3 Relevancia de políticas de gestión y conservación del suelo

La implementación exitosa de nuevas técnicas como la encapsulación de nutrientes en la restauración de suelos quemados no depende solo de la ciencia, sino también de un marco de políticas y gestión adecuado. En los últimos años, los organismos regulatorios han comenzado a abordar la cuestión de los fertilizantes de liberación controlada en contextos ambientales. Por ejemplo, la Unión Europea ha introducido legislación para garantizar que los fertilizantes encapsulados sean compatibles con la restauración ecológica: a partir de 2026, solo se permitirán enmiendas con recubrimientos poliméricos que cumplan criterios estrictos de biodegradabilidad.

Esta medida, parte del nuevo Reglamento de Productos Fertilizantes de la UE, busca evitar la acumulación de microplásticos en suelos y aguas derivada de cápsulas no degradables. Gracias a ello, las empresas están desarrollando recubrimientos certificados como biodegradables en suelo, lo que allanará el camino para usar fertilizantes de liberación lenta en proyectos de restauración con garantías ambientales.

A nivel gubernamental y de gestión, se observa una creciente integración de la restauración post-incendio en estrategias amplias de conservación del suelo y resiliencia climática. Múltiples países han

asumido compromisos internacionales de restaurar tierras degradadas, que incluyen superficies afectadas por incendios forestales. Iniciativas globales como el *Bonn Challenge* plantean metas ambiciosas (restaurar 350 millones de hectáreas de ecosistemas degradados al 2030) y muchos planes nacionales de cambio climático incorporan programas de restauración forestal a gran escala.



Figura 2-10 Iniciativa Emblemática de Restauración Mundial de la ONU - iniciativa de Restauración de los Bosques Mediterráneos, Líbano [47]

En este contexto, la restauración tras incendios se ve impulsada por fondos y colaboraciones internacionales. Un ejemplo reciente es la iniciativa “Restauración de Bosques Mediterráneos”, que involucra a varios países (España, Líbano, Marruecos, Turquía, entre otros) y que fue reconocida en 2024 por la ONU como proyecto emblemático de la *Década de las Naciones Unidas sobre Restauración de Ecosistemas* [48] (Figura 2-10). Dicho proyecto ya ha restaurado alrededor de 2 millones de hectáreas desde 2017 y se propone recuperar 8 millones de hectáreas adicionales para 2030, incluyendo áreas afectadas por incendios.

Esta magnitud de esfuerzos requiere soluciones efectivas y eficientes, por lo que organismos internacionales y gobiernos están interesados en nuevas herramientas que potencien la restauración. La encapsulación de nutrientes, de demostrar su eficacia, podría ser respaldada en tales programas.

La educación ambiental y la divulgación son igualmente pilares para la adopción de enfoques sostenibles en la fertilización post-incendio. Es fundamental que los gestores forestales, comunidades locales y voluntarios entiendan la importancia de restaurar el suelo de forma integral, no solo repoblando con plantas sino también recuperando la fertilidad y funcionalidad edáfica. En este sentido, cada vez más iniciativas de divulgación destacan prácticas como el compostaje de restos orgánicos, la siembra de especies nativas y la mejora del suelo tras el fuego. Por ejemplo, divulgadores científicos han subrayado el gran beneficio de utilizar enmiendas orgánicas para regenerar suelos calcinados, aunque advierten que los resultados no son inmediatos y requieren constancia en el tiempo.

Por último, inculcar en el público la importancia de conservar el suelo tras un incendio –evitando sobrepastoreo inmediato, realizando labores de restauración temprana y aplicando enfoques innovadores cuando proceda– es parte de una ética de gestión del territorio más preventiva y proactiva. Las políticas deben ir acompañadas de campañas de sensibilización que muestren que un suelo saludable es la base para la recuperación del ecosistema, y que herramientas sostenibles como la encapsulación de nutrientes pueden ser aliadas para lograr bosques resilientes tras el fuego.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales y Métodos

3.1.1 Área de estudio

Los experimentos que se han llevado a cabo para la realización de este TFG se han llevado a cabo en el laboratorio de investigación de la Escuela Naval Militar (ENM), ubicada en Marín, Pontevedra (Galicia, España).

Este laboratorio ofrece condiciones controladas para la realización de ensayos de evaluación de suelos y germinación de semillas a través de los equipos disponibles en el mismo.

Los experimentos se han desarrollado durante los meses de Enero, Febrero y Marzo de 2025, periodo en el cual se han simulado las temperaturas de incendios forestales de distinta intensidad sobre muestras de suelo con el objetivo de estudiar la eficacia de la encapsulación de nutrientes en la recuperación de suelos quemados y la germinación de especies vegetales seleccionadas.

3.1.2 Materiales Utilizados

Los ensayos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio. El laboratorio utilizado está equipado con materiales estándar para la realización de experimentos químicos y termodinámicos, incluyendo matraces, agitadores magnéticos y eléctricos, tubos de vidrio y balanzas analíticas.

Para la evaluación de los parámetros físico químicos del suelo, se utilizaron dos dispositivos específicos:

- Medidor de pH de Suelo 6 en 1 (marca LWMTT): con pantalla LCD retroiluminada, capaz de medir fertilidad del suelo, humedad, pH, temperatura, intensidad de luz solar y humedad ambiental. Este equipo fue adquirido específicamente para este estudio (Figura 3-1).



Figura 3-1 Medidor de pH de suelo 6 en 1 [49]

- Medidor digital de nutrientes 4 en 1 (marca Generic): diseñado para determinar concentraciones específicas de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y temperatura del suelo, proporcionando una alta precisión en la evaluación de nutrientes presentes (Figura 3-2).



Figura 3-2 Medidor Niveles N,P,K [50]

El sustrato empleado para los experimentos fue tierra adquirida en una tienda de jardinería, garantizando así homogeneidad en las muestras analizadas.

Para simular las condiciones térmicas post-incendio en el suelo, se utilizó una mufla eléctrica de laboratorio marca Nabertherm, capaz de alcanzar temperaturas regulables en el rango de 30 a 3000°C. Este equipo permitió aplicar al suelo tratamientos térmicos precisos de 100°C, 300°C, 500°C y 600°C en intervalos controlados de tiempo.

Para evaluar la capacidad de revegetación en las condiciones ensayadas, se empleó una mezcla comercial de semillas de lechuga de rápido crecimiento (*Lactuca sativa* L.), compuesta por tres variedades diferentes, seleccionada por su elevada tasa de germinación y rápido desarrollo. Para la germinación de estas semillas se emplearon bandejas de cultivo específicas (Figura 3-3), compuestas por una cúpula de crecimiento con iluminación integrada, y una base que asegura la creación de

condiciones adecuadas de humedad y temperatura, ideales para favorecer el desarrollo temprano de las plántulas.



Figura 3-3 Bandejas semillero con lámpara de germinación [51]

Adicionalmente, se utilizó una cámara microscópica para realizar ensayos específicos de hidrofobia del suelo, lo cual permitió evaluar la repelencia al agua tras la aplicación de diferentes tratamientos térmicos y condiciones post- incendio.

3.1.3 Procedimiento de quemado de las muestras a distintas temperaturas en laboratorio y caracterización inicial

El diseño experimental para la realización de este TFG se ha estructurado en diferentes etapas con el fin de evaluar el efecto de las temperaturas simuladas post-incendio sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como la capacidad posterior del mismo para germinar y favorecer el crecimiento de vegetación (Figura 3-4).

En primer lugar, se analizaron los parámetros fisicoquímicos del suelo adquirido mediante el medidor de suelo 6 en 1 (fertilidad, humedad, pH, temperatura, luz solar y humedad ambiental) y el medidor digital de nutrientes 4 en 1 (nitrógeno, fósforo, potasio y temperatura del suelo). Estos valores, que se tomaron 4 veces cada uno calculando el valor medio posteriormente, se registraron como referencia para establecer el estado inicial del suelo antes de los tratamientos térmicos.

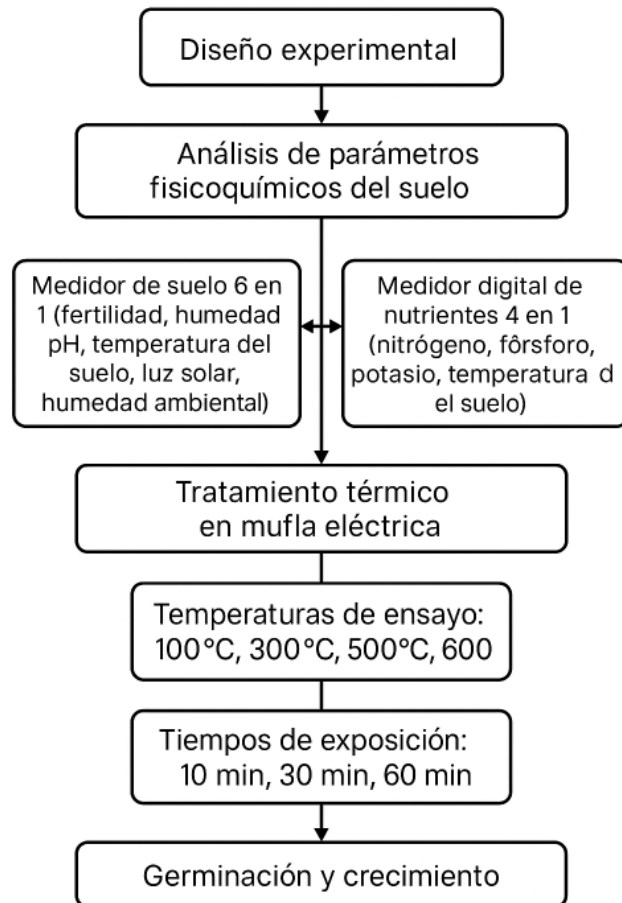


Figura 3-4 Esquema del procedimiento general del TFG

Tras obtener los valores iniciales del suelo, este fue sometido a un tratamiento térmico controlado mediante una mufla eléctrica de alta precisión marca Nabertherm (Figura 3-5). Se establecieron cuatro temperaturas de ensayo: 100°C, simulando un incendio de baja intensidad; 300°C, simulando un incendio de intensidad media y a 500°C y 600°C, simulando incendios de alta intensidad. Para cada temperatura, se aplicaron tres tiempos diferentes de exposición térmica: 10, 30 y 60 minutos. Estos tratamientos térmicos se realizaron con muestras independientes y homogéneas del suelo inicial, obtenidas de la misma muestra de tierra.



Figura 3-5 Mufla Nabertherm empleada para tratamiento térmico de muestras [52]

Una vez concluidos los tratamientos térmicos, cada muestra fue enfriada a temperatura ambiente, tras lo cual se midieron nuevamente los parámetros fisicoquímicos mencionados anteriormente empleando los mismos instrumentos.

Todos los datos obtenidos fueron registrados y organizados para permitir un análisis comparativo entre los diferentes tratamientos, facilitando la identificación de cambios significativos en las propiedades del suelo inducidos por la temperatura y el tiempo de exposición al calor.

Este procedimiento permitió realizar un análisis sistemático y detallado de la evolución de los nutrientes y parámetros fisicoquímicos del suelo en condiciones simuladas post-incendio.

3.1.4 Procedimiento experimental del ensayo de fitotoxicidad

El ensayo de fitotoxicidad se realizó siguiendo una versión adaptada del método de Zucconi [53]. Con este método se puede evaluar la posible influencia negativa del suelo tratado térmicamente sobre la capacidad germinativa y el desarrollo inicial de las semillas.

Para preparar las muestras, se tomó una porción de suelo de cada tratamiento térmico realizado (100°C, 300°C, 500°C y 600°C, en intervalos de tiempo de 10, 30 y 60 minutos). Estas muestras se mezclaron con agua destilada en una proporción peso/volumen de 1:10, formando así un extracto acuoso. La mezcla se agitó durante 2 horas para asegurar una adecuada extracción de los compuestos solubles presentes en el suelo (Figura 3-6).



Figura 3-6 Agitadora Cienytech para preparación de mezcla

Tras este proceso, el extracto acuoso fue separado mediante un sistema de filtración por vacío. El sistema de filtración utilizado estaba compuesto por un matraz Kitasato conectado mediante una manguera al grifo de agua, que generaba vacío por efecto Venturi, y una pieza superior fijada con una pinza metálica (Figura 3-7). En esta pieza superior se colocó un papel de filtro para retener las partículas de suelo, permitiendo obtener el extracto acuoso limpio en el matraz.



Figura 3-7 Sistema de filtración por vacío

Una vez obtenido el extracto acuoso filtrado, se colocaron 3 ml de este extracto en recipientes circulares de plástico. A continuación, se añadieron cuidadosamente 10 semillas del mix de lechugas (*Lactuca sativa* L.) previamente seleccionado. Cada recipiente fue cerrado con su tapa correspondiente y sellado herméticamente mediante parafilm para evitar contaminaciones externas y mantener las condiciones constantes (Figura 3-8).



Figura 3-8 Muestras de semillas con extracto acuoso filtrado

Finalmente, los recipientes preparados se incubaron en una estufa a temperatura constante de 28 °C, manteniéndolos en oscuridad durante un periodo de 5 días. Pasado este tiempo, se procedió a analizar el

número de semillas que habían germinado en cada muestra y se midieron tanto la longitud de las raíces como la longitud del tallo.

Los resultados se analizaron utilizando el Índice de Germinación (IG), calculado mediante la fórmula propuesta por Zucconi:

$$IG = \frac{\%G \times Lm}{Lc}$$

Donde:

- **%G:** Porcentaje de semillas germinadas con respecto al control con agua destilada.
- **Lm:** Longitud media de las raíces de las semillas germinadas en el tratamiento.
- **Lc:** Longitud media de las raíces de las semillas germinadas en el control con agua destilada.

Este método permitió evaluar claramente la influencia del suelo tratado térmicamente sobre la germinación y crecimiento inicial, identificando posibles efectos fitotóxicos derivados de los tratamientos térmicos aplicados al suelo.

3.1.5 Procedimiento experimental del ensayo de hidrofobia del suelo

Para evaluar los cambios en las propiedades hidrofóbicas del suelo debido a los tratamientos térmicos aplicados, se llevó a cabo un ensayo específico utilizando muestras representativas de cada condición experimental (temperaturas: 100°C, 300°C, 500°C y 600°C; tiempos: 10, 30 y 60 minutos).

El procedimiento consistió en colocar pequeñas muestras de suelo tratado sobre placas individuales, garantizando que estas estuvieran niveladas y uniformemente distribuidas para facilitar su posterior análisis.

Para realizar el análisis detallado, se empleó una cámara microscópica digital que permitió capturar imágenes en alta resolución de la interacción entre las muestras de suelo y las gotas de agua aplicadas (Figura 3-9). Esta técnica proporcionó información sobre la hidrofobicidad superficial, permitiendo evaluar visualmente los ángulos de contacto formados entre las gotas de agua y la superficie del suelo.



Figura 3-9 Captura de prueba con muestra de suelo tratado a 300°C durante 60 minutos

Posteriormente, las grabaciones obtenidas fueron analizadas mediante un software especializado (Ossila Contact angle software) [54] que permitió calcular con precisión el ángulo de contacto, indicador clave para determinar el grado de hidrofobia o hidrofilia del suelo tras la exposición a las diferentes temperaturas y tiempos (Figura 3-10). Estos resultados facilitaron la identificación de cambios significativos en las propiedades de hidrofobicidad del suelo debidos a los tratamientos térmicos simulados, un aspecto importante para comprender su comportamiento en escenarios reales post-incendio.

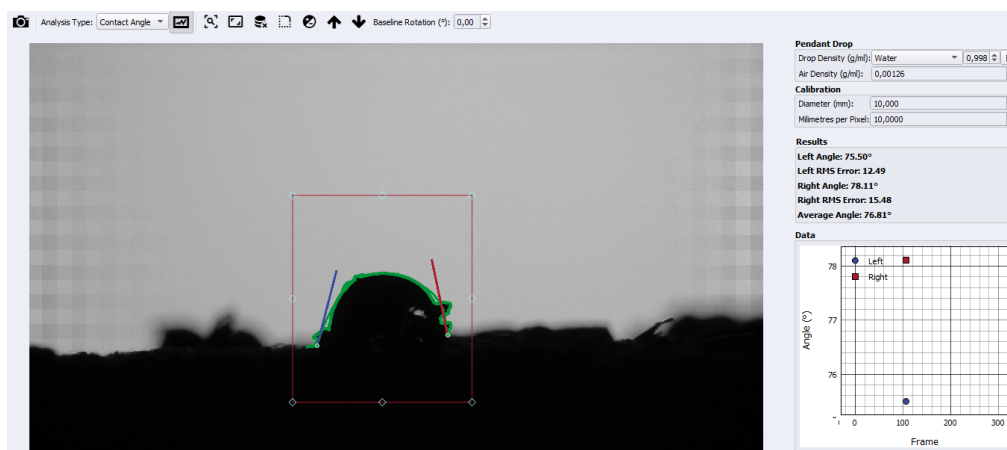


Figura 3-10 Captura de análisis de muestra mediante software informático

3.1.6 Preparación de hidrotalcita

Para la elaboración de la hidrotalcita que posteriormente utilice como nutriente para las cápsulas, la primera fase consistió en la preparación de dos disoluciones, una primera formada por nitrato de aluminio ($Al(NO_3)_3$) y nitrato de magnesio ($Mg(NO_3)_2$), obteniendo así el anión interlamilar y otra disolución compuesta de carbonato de sodio (Na_2CO_3), para obtener cationes metálicos.

Los materiales utilizados para la elaboración de estas disoluciones fueron: nitrato de aluminio $Al(NO_3)_3$, nitrato de magnesio $Mg(NO_3)_2$, carbonato de sodio Na_2CO_3 , una báscula, agua destilada, vidrios de reloj, dos matraces aforados, agitador magnético, vasos de precipitado y espátulas.

El primer paso para la elaboración de la disolución con el anión interlamilar en una concentración de 0,7 mol/L y con una relación de cationes de 3:1 fue realizar el siguiente cálculo:

$$0,7 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,5 \text{ L} = 0,35 \text{ moles totales}$$

Al aplicar la proporción anteriormente nombrada de 3:1 quedaría: 0,2625 moles $Mg(NO_3)_2$ y 0,0875 moles $Al(NO_3)_3$. Con esta proporción el siguiente paso fue calcular la cantidad de masa que se utilizaría de cada componente.

$$0,2625 \text{ mol } Mg(NO_3)_2 \times 256,41 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 67,308 \text{ g } Mg(NO_3)_2$$

$$0,0875 \text{ mol } Al(NO_3)_3 \times 375,13 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 32,824 \text{ g } Al(NO_3)_3$$

Con los valores calculados se añadieron 0,5 L de agua destilada a cada uno de los dos componentes para formar las dos disoluciones necesarias. Estas disoluciones se introdujeron en un matraz sobre un agitador magnético funcionando a 400 rpm durante 5 minutos, garantizando así unas mezclas homogéneas (Figura 3-11).



Figura 3-11 Agitado mezcla a 400 rpm

El último paso consistió en realizar la tercera disolución (Na_2CO_3), realizándose los siguientes cálculos para ello:

$$0,879 \frac{mol}{L} Na_2CO_3 \times 0,5 L = 0,4395 moles Na_2CO_3$$

$$0,4395 mol Na_2CO_3 \times 106 \frac{g}{mol} = 46,587 g Na_2CO_3$$

Tras calcular la masa de nitrato de sodio necesaria, se procedió siguiendo el mismo proceso que con las disoluciones anteriores obteniéndose una mezcla homogénea.

Para la segunda fase de la formación de hidrotalcita se emplearon 2 buretas, pinzas metálicas, vasos de precipitado de 1L, agua destilada, medidor de pH, agitador magnético, barra agitadora, vidrios de reloj, estufa, papel film y equipo de filtración (matraz Kitasato, embudo Büchner, trompa de vacío y filtros (Figura 3-12).

Se utilizaron las disoluciones preparadas anteriormente y ácido clorhídrico HCl e hidróxido de sodio NaOH para la estabilización de la mezcla en un pH de $10 \pm 0,2$. Para conseguir la estructura tridimensional de la se realizó un goteo con caudal de 1ml/min, debiendo ser un proceso lento para el desarrollo óptimo de la misma.

Durante el proceso de goteo la mezcla fue agitada de forma continua a 300 rpm, regulándose durante todo el proceso el pH de la mezcla ya se debía encontrar entre los valores 9,8 y 10,2. El montaje quedó de tal manera que se colocó el carbonato de sodio en el vaso de precipitado de 1L, debajo las buretas con goteo simultáneo de ambas disoluciones de nitrato de magnesio y nitrato de aluminio.

Esta mezcla fue agitada con el agitador magnético a 300 rpm, consiguiendo la correcta homogenización de la hidrotalcita. Para la regulación del valor de pH se empleo HCl (reduce el pH) e hidróxido de sodio NaOH (eleva el pH). Para la medición del pH se empleo un medidor de la empresa HANNA cuyo modelo era el EdgePh.



Figura 3-12 Montaje elaboración hidrotalcita

Para permitir el ordenamiento de la estructura laminar, tras la finalización del proceso de agitación se mantuvo en reposo durante 24 horas. La disolución durante este periodo se mantuvo sellada con Parafilm evitando de esta manera la contaminación y favoreciendo a su buena conservación. Una vez transcurrido el tiempo necesario de reposo, se realizó el proceso de filtración del sólido, donde se aplicó el vacío con un matraz Kitasato. El montaje consistió en conectar el matraz Kitasato con una manguera generadora del vacío necesario, se colocó un embudo Büchner con un papel filtro encima del matraz (Figura 3-13).



Figura 3-13 Montaje filtración de hidrotalcita

Tras la filtración la mezcla pasó por una serie de lavabos en el filtro con agua destilada para disminuir el pH a 8,5 y deshaciéndonos del exceso de iones hidroxilo formados en la hidrotalcita.

El paso final del proceso consistió en el secado de la hidrotalcita mediante estufa a 100°C durante 24 horas. Tras el secado se empleó un mortero para homogeneizar el producto final, obteniéndose así un total de 24,06 g de hidrotalcita.

3.1.7 Elaboración de Cápsulas de Nutrientes

Para la elaboración de las cápsulas de nutrientes se utilizó el método de encapsulación iónica con alginato de sodio, generando una estructura sólida mediante interacción iónica al entrar en contacto con una solución salina.

En primer lugar, se preparó una disolución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) con una concentración molar de 0,75 M en 0,5 L de agua destilada (Figura 3-14). Para alcanzar esta concentración, tras realizar los cálculos pertinentes, se añadieron 55 g de NaCl al volumen indicado de agua destilada, asegurando la completa disolución mediante agitación magnética.

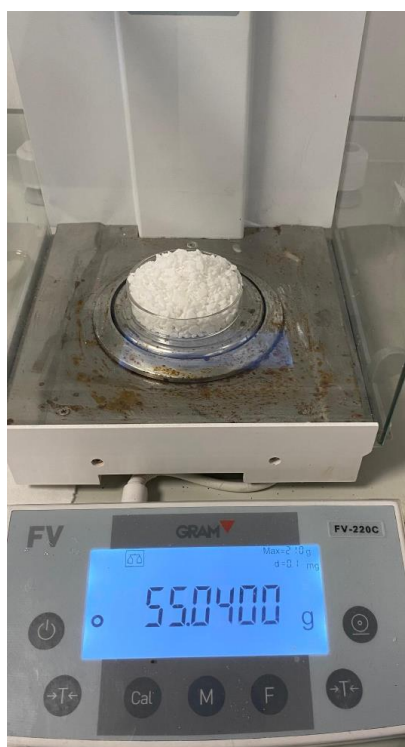


Figura 3-14 Cloruro de sodio (HCl) para elaboración de disolución acuosa

Se elaboraron dos tipos diferentes de cápsulas nutricionales:

- Cápsulas con solución de macronutrientes:

La primera preparación consistió en mezclar 100 ml de una solución previamente preparada por el AF Togores de Vicente el año anterior (Figura 3-15), que contenía los macronutrientes esenciales: cloruro de amonio (NH_4Cl), fosfato monopotásico (KH_2PO_4) y nitrato de potasio (KNO_3), con 4 g de alginato de sodio (Figura 3-16). La mezcla se agitó a 405 rpm mediante un agitador magnético hasta obtener una consistencia homogénea y viscosa. Posteriormente, mediante una jeringuilla, se depositaron gotas individuales de esta mezcla en un matraz con la solución de cloruro de sodio, mantenida bajo agitación magnética constante. Al contacto con la solución salina, las gotas se solidificaron parcialmente formando pequeñas cápsulas esféricas (Figura 3-17). Estas perlas fueron posteriormente retiradas y almacenadas en un matraz con una pequeña cantidad de la solución de NaCl para evitar su deshidratación y mantener su integridad.



Figura 3-15 Mezcla de macronutrientes (NH_4Cl , KH_2PO_4 y KNO_3)

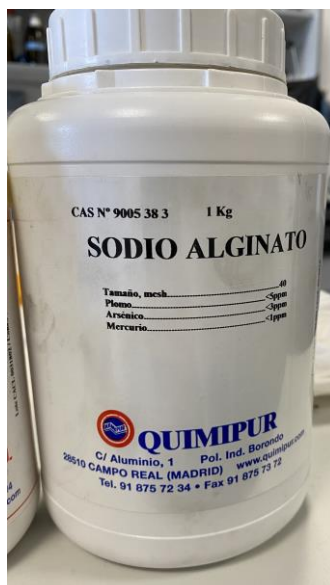


Figura 3-16 Sodio alginato

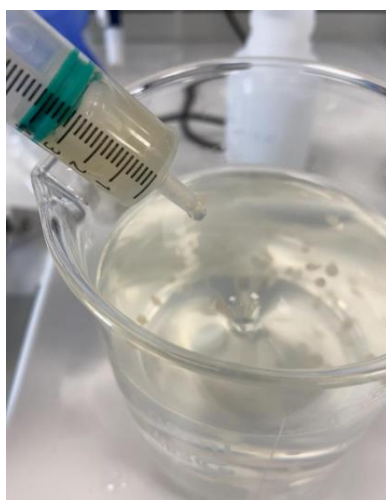


Figura 3-17 Adición de mezcla de macronutrientes y alginato de sodio a disolución de cloruro de sodio mediante jeringuilla para creación de perlas

- Cápsulas con hidrotalcita:

La segunda preparación se realizó mediante un proceso similar, pero en esta ocasión la mezcla estuvo compuesta por 100 ml de agua destilada, 4 g de alginato de calcio y 4 g de hidrotalcita previamente sintetizada. El procedimiento posterior de encapsulación fue idéntico al descrito anteriormente, obteniendo perlas sólidas con hidrotalcita incorporada en su estructura (Figura 3-18) (Figura 3-19).

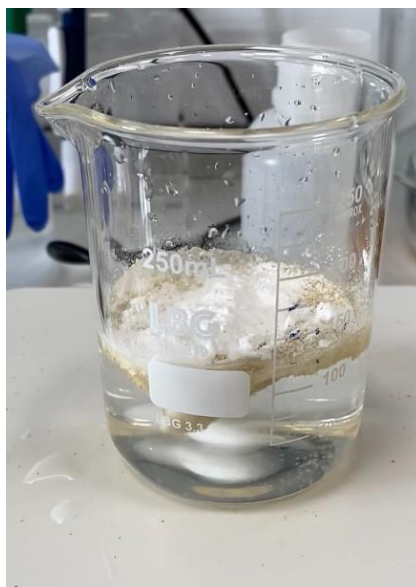


Figura 3-18 Mezcla de hidrotalcita y Sodio Alginato sobre agitador magnético



Figura 3-19 Creación de perlas de hidrotalcita

Este método aprovechó la propiedad química del alginato de sodio, cuya estructura polimérica tiene la capacidad de gelificar en presencia de soluciones iónicas como el cloruro de sodio, generando estructuras sólidas tridimensionales mediante reticulación iónica.

Las cápsulas obtenidas proporcionaron un medio controlado para la liberación progresiva de los nutrientes encapsulados durante el desarrollo de las pruebas de germinación y crecimiento vegetal.

3.1.8 Ensayo final de germinación y crecimiento vegetal con cápsulas de nutrientes

Una vez preparadas las cápsulas de nutrientes mediante encapsulación iónica, se llevó a cabo el ensayo final destinado a evaluar la influencia de estas cápsulas sobre la germinación y el crecimiento inicial de semillas en suelos sometidos previamente a tratamientos térmicos.

Para ello, se dispusieron muestras de suelo tratado a distintas temperaturas (100°C, 300°C, 500°C y 600°C) durante tiempos variables (10, 30 y 60 minutos) en recipientes individuales. En cada muestra de suelo se introdujeron cinco cápsulas del tipo correspondiente (cápsulas con disolución de macronutrientes y cápsulas con hidrotalcita), junto con semillas seleccionadas del mix de lechugas (Figura 3-20) (Figura 3-21). Se añadió agua destilada a cada recipiente en cantidades suficientes para mantener la humedad adecuada, asegurando condiciones homogéneas para todas las muestras.



Figura 3-20 Muestra de tierra con 5 semillas y 5 cápsulas de hidrotalcita



Figura 3-21 Muestra de tierra con 5 semillas y 5 cápsulas de macronutrientes

Posteriormente, los recipientes se mantuvieron durante una semana en condiciones ambientales controladas a temperatura ambiente (aproximadamente 20-22°C) y con exposición diaria a luz natural diurna. Al finalizar este periodo de tiempo, se procedió a evaluar la germinación efectiva de las semillas y a medir la longitud de los tallos y raíces desarrollados, con el objetivo de determinar el efecto beneficioso de las cápsulas de nutrientes sobre la recuperación vegetal en condiciones simuladas de suelo post-incendio.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados del análisis de propiedades fisicoquímicas del suelo tras tratamiento térmico

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos tras analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo a diferentes temperaturas (100°C, 300°C, 500°C y 600°C) durante distintos intervalos de tiempo (5, 30 y 60 minutos). Los parámetros evaluados fueron el contenido de Potasio (K), Nitrógeno (N), Fósforo (P), fertilidad del suelo (conductividad eléctrica), humedad y pH. Estos parámetros son fundamentales para determinar el grado de afectación del suelo tras un incendio y evaluar su capacidad para permitir la revegetación.

4.1.1 Contenido de potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P)

Los resultados de las mediciones tomadas tras aplicar los distintos tratamientos térmicos a las muestras de suelo fueron los siguientes en cuanto a los niveles de potasio, nitrógeno y fósforo (Tabla 4-1):

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Potasio (mg/kg)	Nitrógeno (mg/kg)	Fósforo (mg/kg)
Neutra (Control)	0	17	6	8
100°C	5	13	7	7
100°C	30	32	11	10
100°C	60	19	7	6
300°C	5	8	6	3
300°C	30	8	3	2
300°C	60	0	0	0
500°C	5	0	0	0
500°C	30	0	0	0
500°C	60	0	0	0
600°C	5	0	0	0
600°C	30	0	0	0
600°C	60	0	0	0

Tabla 4-1 Resultados de nutrientes (N, P, K) en muestras de suelo sometidas a tratamientos térmicos

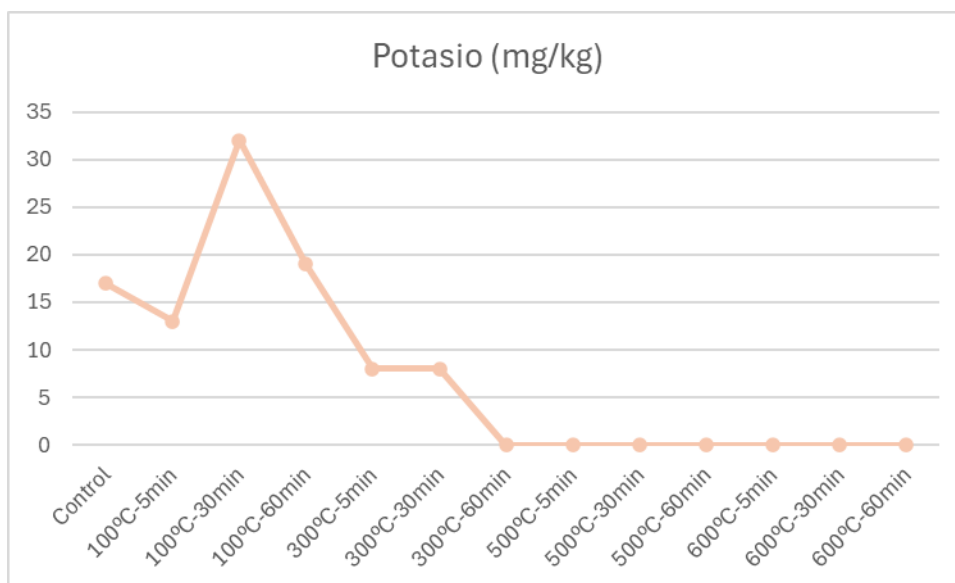


Tabla 4-2 Variación del contenido de potasio (K) en suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición



Figura 4-1 Valor de potasio presente en la muestra sometida a 100°C durante 5 minutos

Tal como se observa en la Tabla 4-2, fruto de los resultados obtenidos con el medidor de valores N, P, K que se observa en la Figura 4-1, tras el tratamiento térmico a 100°C durante 30 minutos, se produjo un aumento significativo en la concentración de potasio (K) en el suelo, alcanzando un valor máximo de 32 mg/kg respecto a los 17 mg/kg iniciales. Este resultado concuerda con las bases científicas, que señala que el potasio puede aumentar tras un incendio debido a la liberación inmediata desde compuestos minerales y orgánicos del suelo. Sin embargo, a temperaturas más elevadas (300-600°C), la concentración de potasio disminuyó rápidamente, acercándose a cero, coincidiendo con los resultados encontrados en estudios previos que indican la degradación extrema de nutrientes esenciales en suelos expuestos a incendios de alta intensidad. En el mismo sentido, en otros estudios [55] se encontró un aumento de potasio en los suelos tras un incendio, hasta un 16,33% aunque con una disminución posterior que se mantuvo hasta cinco años tras el incendio. Este efecto depende de la severidad del fuego, puesto que en suelos de alta severidad las concentraciones experimentaron un descenso desde el inicio [56] [57].

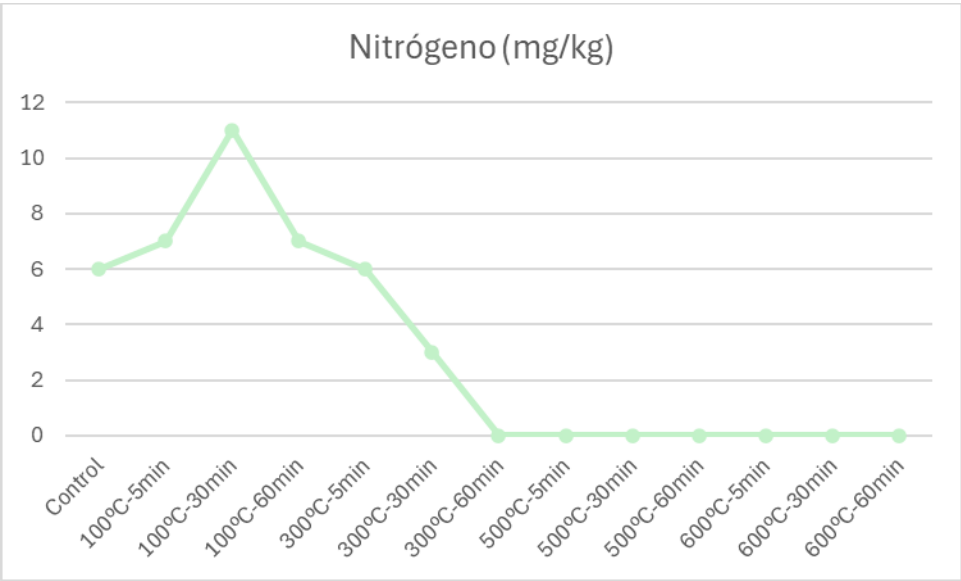


Tabla 4-3 Variación del contenido de nitrógeno (N) en el suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición



Figura 4-2 Valor de nitrógeno presente en la muestra sometida a 100°C durante 60 minutos

La Tabla 4-3 muestra claramente cómo el contenido de nitrógeno en el suelo, obtenido con el medidor de valores N, P, K reflejado en la Figura 4-2, aumenta inicialmente tras el tratamiento a 100°C durante 30 minutos, alcanzando un máximo de aproximadamente 11 mg/kg, lo cual está en línea con la teoría sobre la mineralización inicial del nitrógeno orgánico. Sin embargo, al incrementar la temperatura a 300°C, especialmente tras exposiciones prolongadas (60 min), se observa una reducción marcada en la concentración de nitrógeno, que alcanza valores cercanos a cero a partir de los 500°C. Este comportamiento coincide con la teoría, confirmando la alta volatilidad del nitrógeno a temperaturas elevadas y su consecuente pérdida desde el suelo tras incendios de alta intensidad.

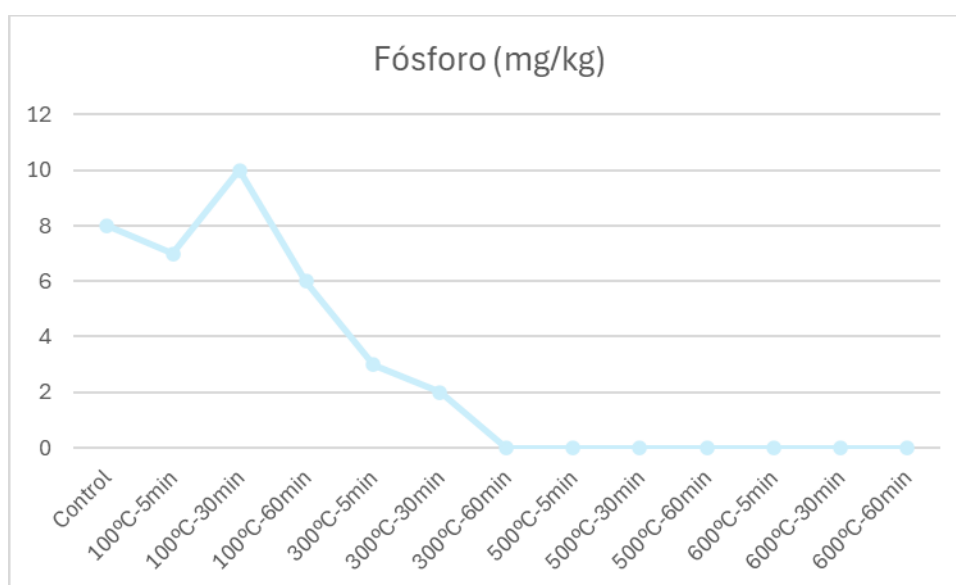


Tabla 4-4 Variación del contenido de fósforo (P) en suelo sometido a diferentes temperaturas y tiempos de exposición



Figura 4-3 Valor de fósforo presente en la muestra sometida a 300°C durante 30 minutos

Como se observa claramente en la Tabla 4-4, el contenido de fósforo, obtenido con el medidor de valores N, P, K que se observa en la Figura 4-3, mostró un incremento inicial tras el tratamiento térmico de 100°C durante 30 minutos, alcanzando aproximadamente 10 mg/kg respecto al valor inicial de 8 mg/kg, coincidiendo con lo esperado teóricamente debido al proceso de mineralización del fósforo

orgánico del suelo. A temperaturas superiores (300-600°C), el contenido de fósforo disminuyó rápidamente hasta valores cercanos a cero, lo que concuerda con la teoría revisada [58], indicando que a estas temperaturas el fósforo se transforma en formas químicas no disponibles para las plantas, limitando así la regeneración natural del ecosistema tras incendios intensos.

Los resultados obtenidos muestran un incremento inicial significativo en los contenidos de potasio, nitrógeno y fósforo en el suelo tratado a 100°C debido a la mineralización parcial de compuestos orgánicos, favoreciendo temporalmente la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal inmediato tras incendios moderados. Sin embargo, a partir de 300°C, especialmente en tratamientos prolongados, la concentración de estos nutrientes disminuye significativamente hasta niveles casi nulos desde 500°C, indicando una grave degradación de la fertilidad del suelo, limitando considerablemente su calidad y capacidad natural de revegetación tras incendios severos, lo que justifica la necesidad de aplicar técnicas específicas de restauración como la encapsulación de nutrientes.

4.1.2 Resultados del análisis de otros parámetros fisicoquímicos del suelo tras tratamiento térmico

Este apartado presenta los resultados obtenidos en la medición de otros parámetros fisicoquímicos del suelo sometido a distintas temperaturas y tiempos de exposición térmica (Tabla 4-5). En concreto, se han evaluado la fertilidad (conductividad eléctrica), la humedad y el pH, todos ellos factores relevantes para determinar la calidad del suelo y su potencial para permitir la recuperación vegetal tras un incendio.

Tratamiento	Fertilidad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Humedad (%)	pH
Control	199	94	4,5
100°C-5min	24	14	7
100°C-30min	23	9	7
100°C-60min	19	2	6,5
300°C-5min	8	4	7
300°C-30min	15	0	7
300°C-60min	0	0	7
500°C-5min	0	0	7,5
500°C-30min	0	0	7,5
500°C-60min	0	0	7,5
600°C-5min	0	0	6
600°C-30min	0	0	7,5
600°C-60min	0	0	7,5

Tabla 4-5 Resultados propiedades del suelo tras tratamientos térmicos



Figura 4-4 Datos tomados muestra a 100°C durante 5 minutos

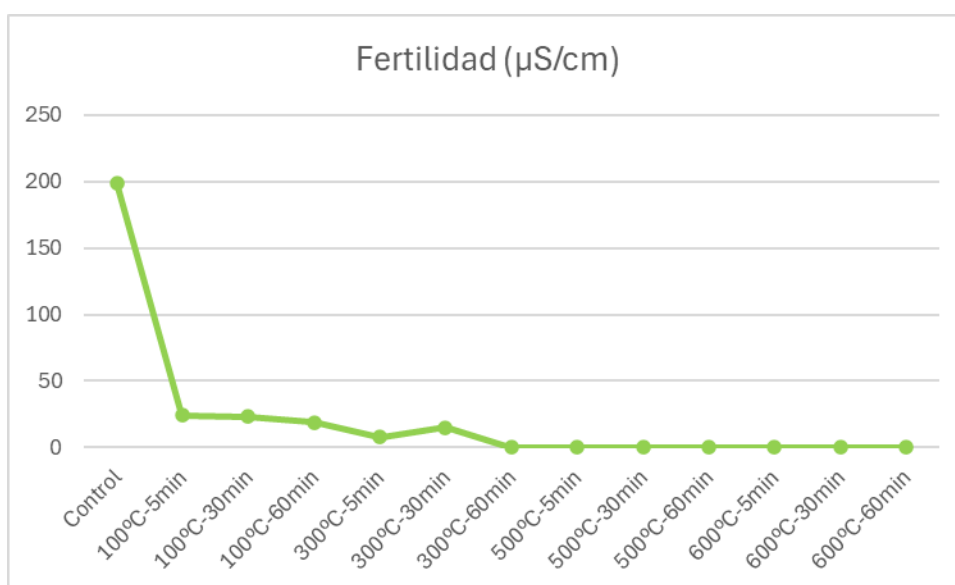


Tabla 4-6 Variación de la fertilidad del suelo (conductividad eléctrica, µS/cm) tras diferentes tratamientos térmicos

La fertilidad del suelo mostró una reducción inicial muy marcada tras el tratamiento térmico a 100°C, pasando de un valor inicial de 199 µS/cm (control) a aproximadamente 24 µS/cm en solo 5 minutos (Figura 4-4), y manteniéndose en valores similares (entre 19 y 23 µS/cm) al prolongar el tiempo hasta 60 minutos. A temperaturas mayores (300°C), la fertilidad continuó disminuyendo rápidamente hasta alcanzar valores nulos desde los 300°C durante 60 minutos en adelante. Este comportamiento indica una destrucción grave de la materia orgánica y la pérdida importante de sales y nutrientes solubles, confirmando así una reducción extrema de la capacidad del suelo para sostener vida vegetal tras exposiciones térmicas superiores a 300°C (Tabla 4-6).

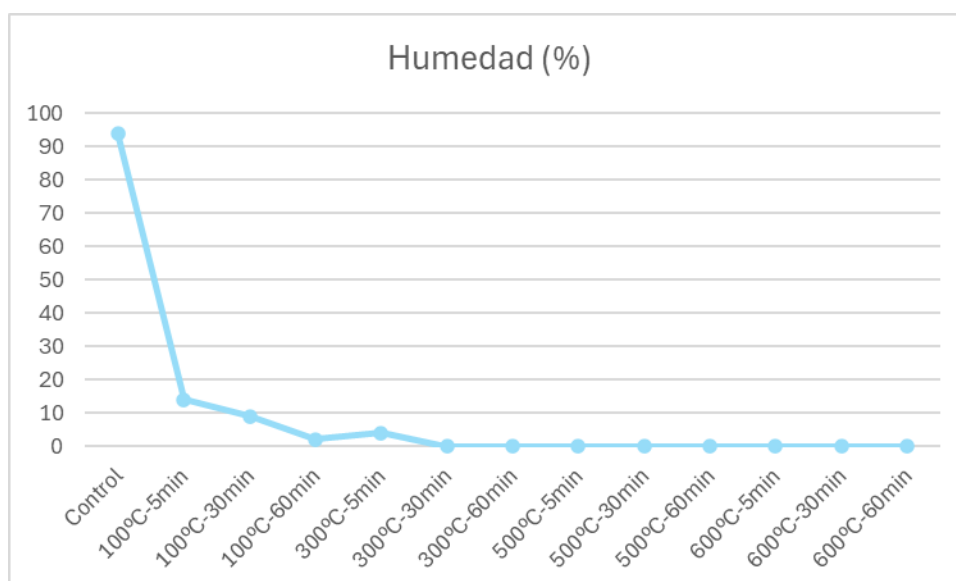


Tabla 4-7 Pérdida de humedad del suelo (%) según temperatura y tiempo de exposición térmica

La humedad del suelo mostró una reducción repentina desde los primeros tratamientos térmicos, pasando rápidamente de un alto valor inicial (94%) a valores muy bajos (14% a 100°C durante solo 5 minutos). Esta caída continúa conforme aumentan el tiempo y la temperatura del tratamiento, alcanzando prácticamente valores nulos desde los 300°C durante 30 minutos y en tratamientos más severos ($\geq 500^\circ\text{C}$). Esta pérdida rápida y total de la humedad refleja la destrucción casi inmediata de la capacidad estructural del suelo para retener agua tras exposición térmica intensa, limitando severamente su capacidad para sostener vida vegetal y afectando negativamente la recuperación natural tras incendios severos (Tabla 4-7).

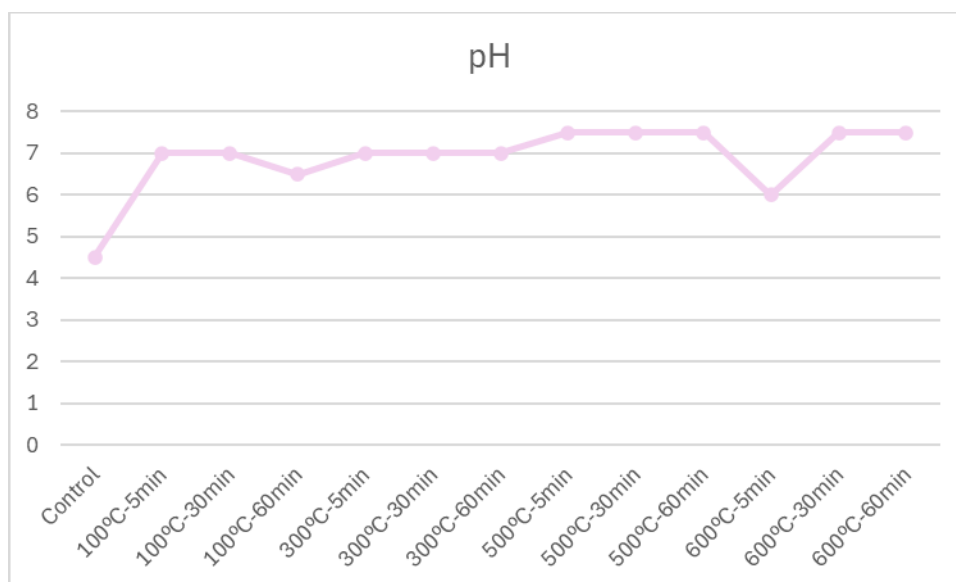


Tabla 4-8 Variación del pH del suelo tras tratamientos térmicos a diferentes temperaturas y tiempos

La variación del pH del suelo tras los tratamientos térmicos confirma un claro incremento desde condiciones ácidas iniciales (4,5) hacia valores neutro-alcalinos (6,5-7,5), lo cual está alineado con la teoría científica [59]. Este cambio de pH refleja la acumulación de cenizas alcalinas y la destrucción de compuestos orgánicos ácidos, afectando directamente la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales y modificando las condiciones para la regeneración vegetal. Este aumento en la alcalinidad podría inicialmente beneficiar la disponibilidad de nutrientes como el fósforo y calcio, pero también puede

limitar a largo plazo la disponibilidad de micronutrientes esenciales para la recuperación completa del suelo tras incendios severos

Los resultados obtenidos muestran que tras el tratamiento térmico, el suelo experimenta una rápida disminución de la fertilidad y la humedad, así como un incremento generalizado del pH hacia valores neutros o alcalinos. La drástica reducción de la fertilidad y la humedad limita severamente la capacidad del suelo para proporcionar nutrientes y agua, condiciones esenciales para la regeneración vegetal. Por otro lado, el aumento del pH podría inicialmente mejorar la disponibilidad de algunos nutrientes como fósforo y calcio, pero a largo plazo dificulta la disponibilidad de micronutrientes esenciales, restringiendo así la diversidad vegetal y complicando la recuperación efectiva de las áreas afectadas por incendios intensos (Tabla 4-8).

4.2 Resultados del ensayo de fitotoxicidad

Este apartado presenta los resultados obtenidos en el ensayo de fitotoxicidad, donde se ha evaluado la capacidad de germinación y el desarrollo inicial de semillas de lechuga sembradas en muestras de suelo sometidas a diferentes temperaturas y tiempos de exposición térmica (Tabla 4-9). Estos resultados permiten analizar cómo la calidad del suelo, afectada por el tratamiento térmico, influye en la regeneración vegetal inicial tras un incendio.

Según estudios de fitotoxicidad [60] [61], valores de IG por debajo de 0,5 sugieren un alto nivel de fitotoxicidad, valores entre 0,5 y 0,8 sugieren un nivel moderado de fitotoxicidad, mientras que valores por encima de 0,8 indican que no existe fitotoxicidad. Cuando el IG supera el valor 1, se puede considerar al material/muestra como fitoestimulante [62].

Tratamiento Térmico	Semillas Germinadas	Medidas (cm)	Longitud Media (cm)	IG
Neutra (Control)	6 de 10	L1= 7,5;L2=9,2;L3=7,6;L4=7;L5=8,4;L6=6	7,9	Control
100°C-5min	6 de 10	L1=8,2;L2=8,5;L3=8,8;L4=9;L5=7;L6=1	7,2	0,91
100°C-30min	6 de 10	L1=8,8;L2=8,4;L3=8,7;L4=8,6;L5=8,3;L6=8	8,4	1,06
100°C-60min	4 de 10	L1=7,4;L2=6,5;L3=8,7;L4=6	7,2	0,6
300°C-5min	8 de 10	L1=2,2;L2=8,2;L3=9;L4=8,9;L5=2;L6=7,5;L7=9;L8=8,1	6,8	1,14
300°C-30min	10 de 10	L1=8,8;L2=1,5;L3=2,2;L4=8,8;L5=6,2;L6=6;L7=4,5;L8=5;L9=6;L10=5	5,5	1,16
300°C-60min	4 de 10	L1=7,5;L2=8,5;L3=7,8;L4=8,4	8,1	0,68
500°C-5min	4 de 10	L1=4,5;L2=9;L3=8,5;L4=6	7,4	0,62
500°C-30min	6 de 10	L1=3;L2=6;L3=6,2;L4=7;L5=8,4;L6=6	5,9	0,75
500°C-60min	2 de 10	L1=6,3;L2=5,7	6	0,25

Tabla 4-9 Resultados del ensayo de fitotoxicidad: semillas germinadas y crecimiento promedio según tratamientos térmicos aplicados al suelo.

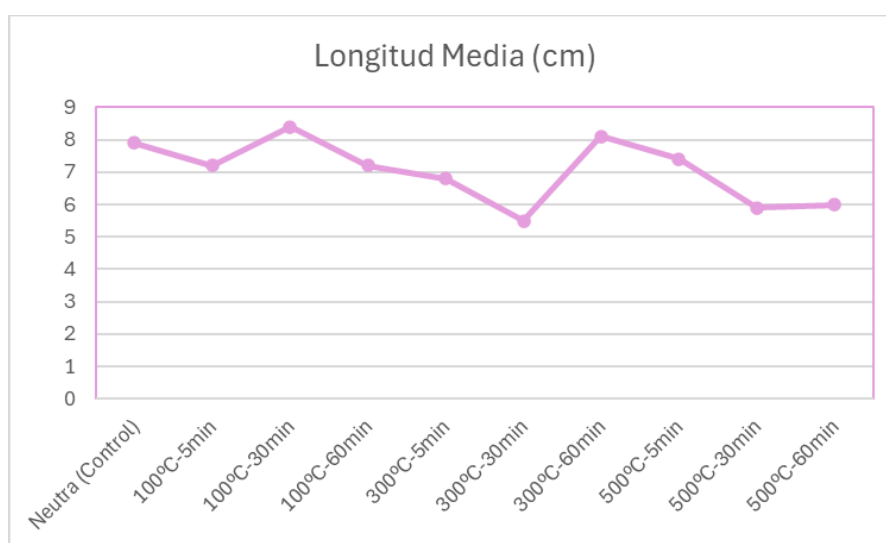


Tabla 4-10 Evolución de la longitud media (cm) del crecimiento de semillas germinadas según tratamientos térmicos del suelo

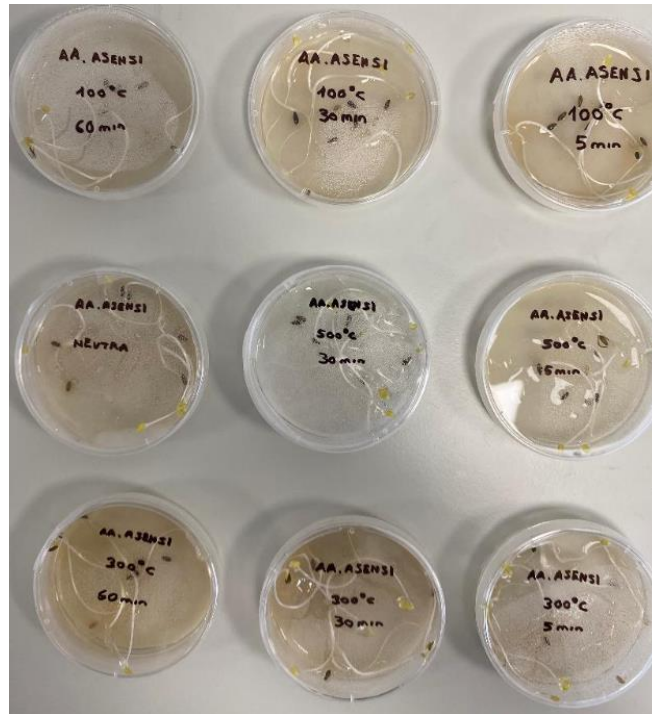


Figura 4-5 Muestras ensayo de fitotoxicidad

Los resultados obtenidos muestran una tendencia parcialmente acorde con lo descrito en la teoría consultada [63]. En general, se observa una reducción del porcentaje de germinación y de la longitud media del crecimiento inicial conforme aumentan la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico aplicado al suelo (Tabla 4-10). Aunque algunas muestras, como la tratada a 300°C durante 30 minutos, presentaron tasas de germinación altas (100%), las mediciones revelan una gran heterogeneidad en la longitud de las plántulas, reflejando condiciones desfavorables y estrés en el suelo. Por otro lado, tratamientos más severos (como el de 500°C durante 60 minutos) muestran claramente una reducción tanto en la germinación (20%) como en la longitud de las plantas germinadas, confirmando así el efecto negativo de temperaturas elevadas sobre la calidad fisicoquímica del suelo y su capacidad para sostener adecuadamente el desarrollo inicial de vegetación (Figura 4-5).

Los resultados obtenidos muestran una tendencia al aumento de la fitotoxicidad de las muestras conforme aumenta el tratamiento térmico al que son sometidas. alguna muestra como la llevada a cabo a 500°C durante 60 minutos llegan a presentar niveles severos de fitotoxicidad (0,25).

4.3 Ensayos Hidrofobicidad del suelo tras tratamientos térmicos

Este apartado presenta los resultados obtenidos en el ensayo de fitotoxicidad realizado sobre muestras de suelo sometidas previamente a distintos tratamientos térmicos.

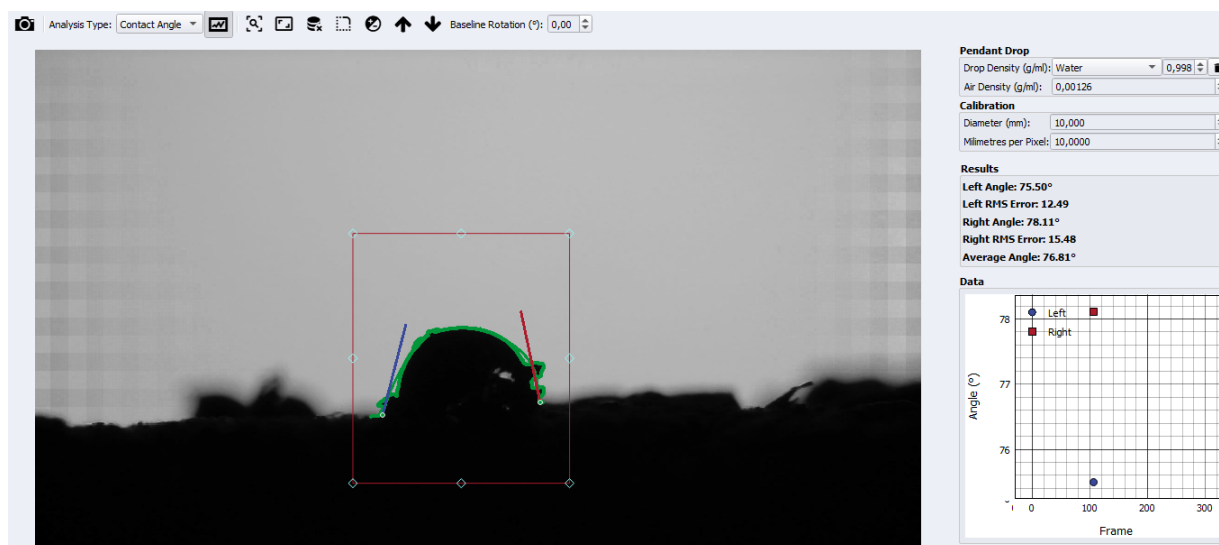


Figura 4-6 Análisis hidrofobicidad muestra a 300°C durante 60 minutos

Según la teoría y los artículos consultados [64], la formación de una capa hidrofóbica en el suelo tras la exposición térmica ocurre principalmente a temperaturas entre 176 y 204 °C. A temperaturas inferiores no suelen producirse estas sustancias repelentes, mientras que exposiciones térmicas significativamente superiores (por ejemplo, superiores a 500°C) destruyen estas sustancias, eliminando la posibilidad de formación de capas hidrofóbicas permanentes.

En el ensayo realizado, se identificó una clara hidrofobicidad en la muestra tratada a 300°C durante 60 minutos (Figura 4-6), lo que está dentro del rango esperado según la teoría. En concreto, el resultado analizado mediante el software especializado mostró un ángulo de contacto promedio de aproximadamente 76,8°, lo cual confirma un comportamiento hidrofóbico significativo. Según criterios comúnmente utilizados, ángulos de contacto superiores a 90° son considerados claramente hidrofóbicos, mientras que valores cercanos a este valor indican una hidrofobicidad moderada a significativa. Debido a esto, aunque el ángulo obtenido (76,8°) indica una hidrofobicidad moderada, confirma que efectivamente se han formado sustancias repelentes en la superficie del suelo debido al tratamiento térmico aplicado, aunque esta formación no haya sido extrema.

La ausencia o menor evidencia de hidrofobicidad en otras muestras podría explicarse por la variabilidad experimental o por la destrucción de estas sustancias en condiciones más extremas (superiores a 300°C o tiempos menores), lo cual es coherente con la teoría. Por tanto, los datos obtenidos respaldan parcialmente lo descrito teóricamente, confirmando que bajo ciertas condiciones específicas (temperaturas moderadas-altas en tiempos prolongados), se genera claramente una capa superficial hidrofóbica en el suelo que reduce la infiltración del agua, afectando negativamente la regeneración vegetal post-incendio.

4.4 Resultados del ensayo de germinación y crecimiento vegetal tras la aplicación de cápsulas con hidrotalcita y macronutrientes en suelos tratados térmicamente

Este apartado presenta los resultados obtenidos en el ensayo final (Tabla 4-11), donde se evaluó la eficacia de las cápsulas con hidrotalcita y macronutrientes para mejorar la germinación y el crecimiento vegetal en suelos previamente tratados térmicamente, así como el índice de germinación para comprobar el nivel de fitotoxicidad de las muestras. El objetivo de este estudio fue determinar cómo la aplicación de nutrientes encapsulados puede mitigar los efectos negativos que el tratamiento térmico tiene sobre las propiedades del suelo y su potencial para sostener el desarrollo inicial de plantas, analizando tanto el porcentaje de germinación como la longitud del crecimiento obtenido en cada muestra.

Cápsulas	Tratamiento	Semillas Germinadas	Longitud Tallo (cm)	Longitud Media Hidrotalcita (cm)	IG
Hidrotalcita	Ambiente	2 de 5	L1= 1;L2= 1,1	1,05	Control
Hidrotalcita	100°C-5min	3 de 5	L1= 0,9;L2= 0,6;L3= 0,4	0,63	0,9
Hidrotalcita	100°C-30min	2 de 5	L1= 0,6;L2= 0,7	0,65	0,62
Hidrotalcita	100°C-60min	1 de 5	L1= 0,6;L2= 0,7	0,6	0,28
Hidrotalcita	300°C-5min	3 de 5	L1= 0,4;L2= 0,6;L3= 0,7	0,57	0,81
Hidrotalcita	300°C-30min	1 de 5	L1= 0,6;L2= 0,7	0,6	0,28
Hidrotalcita	300°C-60min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	500°C-5min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	500°C-30min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	500°C-60min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	600°C-5min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	600°C-30min	0 de 5	0	0	0
Hidrotalcita	600°C-60min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	Ambiente	1 de 5	L1= 0,5	0,5	Control
Nutrientes	100°C-5min	3 de 5	L1= 1,2;L2= 0,5;L3= 0,7	0,8	4,8
Nutrientes	100°C-30min	1 de 5	L1= 0,6;L2= 0,7	0,65	1,3
Nutrientes	100°C-60min	1 de 5	L1= 0,7	0,7	1,4
Nutrientes	300°C-5min	3 de 5	L1= 0,5;L2= 0,6;L3= 0,7	0,6	3,6
Nutrientes	300°C-30min	1 de 5	L1= 0,3	0,3	0,6
Nutrientes	300°C-60min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	500°C-5min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	500°C-30min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	500°C-60min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	600°C-5min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	600°C-30min	0 de 5	0	0	0
Nutrientes	600°C-60min	0 de 5	0	0	0
Sin Capsula	Ambiente	0 de 5	0	0	0

Tabla 4-11 Resultados de germinación y crecimiento vegetal tras aplicación de cápsulas con hidrotalcita y macronutrientes en suelos sometidos a distintos tratamientos térmicos.



Figura 4-7 Plántulas muestra con tratamiento a 100°C durante 30 minutos y con cápsulas de hidrotalcita

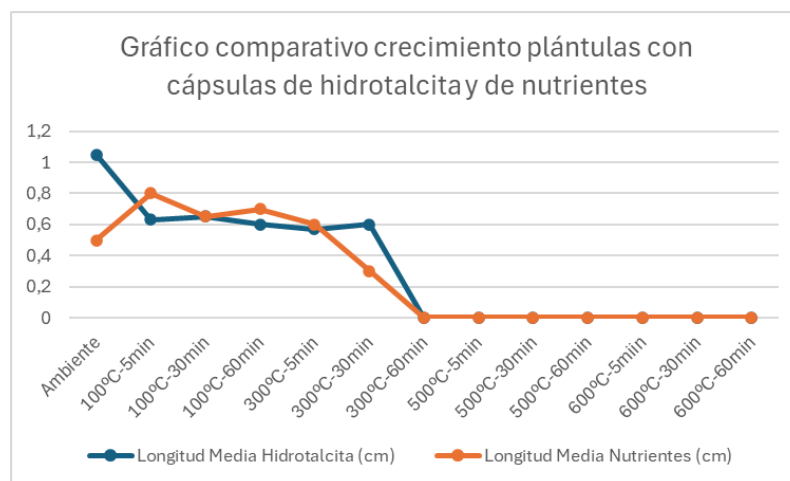


Tabla 4-12 Gráfica comparativa crecimiento plántulas con cápsulas de hidrotalcita y de nutrientes

Los resultados obtenidos en el ensayo con cápsulas de hidrotalcita y macronutrientes muestran una clara correspondencia con la teoría revisada, indicando que la eficacia de la encapsulación de nutrientes está altamente condicionada por el tratamiento térmico previo del suelo. En condiciones ambientales, las cápsulas con hidrotalcita presentaron mejores resultados en cuanto a germinación y crecimiento promedio (2 semillas germinadas con una media de 1,05 cm) (Figura 4-7) en comparación con las cápsulas de macronutrientes (1 semilla germinada, media de 0,5 cm). Sin embargo, al considerar tratamientos térmicos moderados (100°C-5min y 300°C-5min), ambas cápsulas mostraron un desempeño similar en germinación, pero las cápsulas con macronutrientes obtuvieron resultados ligeramente superiores en términos de crecimiento inicial de las plántulas.

A medida que aumentan la temperatura y el tiempo de exposición térmica del suelo (a partir de 300°C durante 30 minutos), la eficacia de ambas cápsulas disminuye notablemente hasta anularse por completo en condiciones extremas. Esta disminución está directamente relacionada con la degradación severa de las propiedades fisicoquímicas del suelo a altas temperaturas, como la pérdida de nutrientes, materia orgánica y cambios estructurales que limitan la capacidad del suelo para sostener vida vegetal, situación que ni las cápsulas de nutrientes ni la hidrotalcita pueden contrarrestar eficazmente.

En cuanto al nivel de fitotoxicidad de las muestras comprobadas empleando el Test de Zucconi [65], se pueden observar varias muestras con niveles severos de fitotoxicidad como por ejemplo la muestra con un tratamiento térmico a 600°C durante 30 minutos con un valor de IG de 0. En general las muestras con tratamientos a temperaturas más altas y tiempos más prolongados de exposición son las que presentan niveles más altos de fitotoxicidad validando las teorías escritas.

En conclusión, ambas cápsulas pueden favorecer la germinación y crecimiento vegetal inicial bajo condiciones térmicas moderadas o suaves, destacándose ligeramente las cápsulas con macronutrientes como más efectivas en estos escenarios intermedios (Tabla 4-12). No obstante, ninguna cápsula es suficiente por sí sola para restaurar completamente suelos sometidos a condiciones térmicas extremas, lo que subraya la necesidad de aplicar técnicas de restauración adicionales o combinadas en áreas afectadas por incendios intensos.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Como conclusión, la realización de este estudio ha proporcionado una perspectiva detallada y crítica sobre los retos que conlleva la restauración ecológica de suelos afectados por incendios forestales. El análisis experimental que se ha llevado a cabo ha permitido confirmar parcialmente las hipótesis iniciales planteadas en cuanto al potencial de las cápsulas con nutrientes para mejorar la recuperación vegetal en suelos degradados por tratamientos térmicos. En este sentido, los resultados indican que, bajo condiciones moderadas o leves de temperatura, las cápsulas de nutrientes logran favorecer significativamente tanto la germinación como el crecimiento inicial de las plantas, evidenciando así su utilidad práctica para intervenciones específicas en áreas afectadas por incendios menos intensos.

Sin embargo, los resultados también han dejado patente una clara limitación cuando los suelos han estado expuestos a condiciones térmicas más severas. En estos casos, las cápsulas analizadas han mostrado una eficacia bastante reducida, llegando incluso a ser insuficientes para promover cualquier recuperación vegetal significativa. Este hecho pone muestra la complejidad real del problema y subraya que la encapsulación de nutrientes, si bien prometedora, no puede ser vista como una solución única o definitiva, especialmente en contextos extremos.

Además, se han observado algunas variaciones en los resultados obtenidos, particularmente en los ensayos relacionados con la fitotoxicidad y el crecimiento vegetal inicial. Estas diferencias pueden atribuirse a la complejidad intrínseca del proceso biológico de germinación y crecimiento de las plantas, así como a pequeñas variaciones naturales en la composición y condiciones del suelo tras los tratamientos térmicos. No obstante, estas variaciones no comprometen la validez general del estudio, sino que más bien reflejan la realidad dinámica y heterogénea del proceso de recuperación ecológica post-incendio.

En definitiva, aunque no todos los resultados obtenidos han sido plenamente satisfactorios o coherentes con las expectativas iniciales, el estudio llevado a cabo ha sido sumamente valioso para identificar las limitaciones reales del método analizado, ofreciendo además información práctica y útil para futuras investigaciones. Estos hallazgos subrayan la necesidad de abordar la restauración ecológica de áreas quemadas desde una perspectiva integral y multidisciplinar, considerando tanto la complejidad ecológica de los ecosistemas afectados como la diversidad de factores que influyen en su recuperación.

5.2 Líneas Futuras

A raíz de los resultados obtenidos y las limitaciones observadas durante el desarrollo de este trabajo, se abren diversas vías interesantes para futuras investigaciones que podrían mejorar notablemente la eficacia de la restauración ecológica tras incendios forestales. Una línea principal podría centrarse en el

desarrollo y optimización de cápsulas con formulaciones avanzadas, explorando el uso de concentraciones más altas o combinaciones específicas de nutrientes esenciales que puedan adaptarse mejor a las necesidades reales de los suelos degradados por el fuego.

Asimismo, se recomienda estudiar diferentes materiales biodegradables que faciliten una liberación más controlada y prolongada de nutrientes, asegurando así un suministro constante y eficiente que pueda soportar las condiciones variables del entorno tras el incendio. Explorar el uso de polímeros biodegradables, hidrogeles u otras sustancias naturales como vehículo para estos nutrientes podría resultar especialmente prometedor.

Otra perspectiva curiosa sería evaluar la combinación de las cápsulas con técnicas complementarias, como la introducción controlada de microorganismos beneficiosos, capaces de potenciar la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas, o el empleo de enmiendas orgánicas como el biochar, que pueden mejorar significativamente las condiciones físicoquímicas del suelo. La integración de diferentes métodos podría permitir superar de forma más eficaz las limitaciones observadas en suelos sometidos a condiciones térmicas extremas.

Además, futuros estudios deberían investigar con mayor profundidad las interacciones específicas entre las cápsulas de nutrientes y diferentes especies vegetales. Realizar ensayos experimentales con diversas especies representativas permitiría identificar aquellas más adecuadas para optimizar los beneficios del método aplicado y potenciar la biodiversidad de las áreas recuperadas.

Finalmente, resulta de gran importancia realizar estudios de mayor duración para evaluar no solo la recuperación inicial del suelo, sino también la evolución y resiliencia del ecosistema en el largo plazo. Estos estudios longitudinales aportarían información valiosa para comprender mejor el impacto real de las intervenciones, contribuyendo así a diseñar estrategias más efectivas y sostenibles para la restauración ecológica tras incendios forestales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Deadly wildfires, noise pollution, and disruptive timing of life cycles: UN report identifies looming environmental threats,» UN Environment Programme, 17 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/deadly-wildfires-noise-pollution-and-disruptive-timing-life-cycles>. [Último acceso: 12 Febrero 2025].
- [2] «Mapa de Incendios Forestales,» Civio Medio Ambiente, 19 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://civio.es/medio-ambiente/mapa-de-incendios-forestales/>. [Último acceso: 2025 Febrero 12].
- [3] «Mapa de incendios forestales,» CIVIO, 19 Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://civio.es/medio-ambiente/mapa-de-incendios-forestales/#grandes-incendios-forestales>. [Último acceso: 2 Febrero 2025].
- [4] Ministerio de Agricultura Alimentación y Pesca, «Los incendios forestales en España,» Gobierno de España, Madrid, 2029.
- [5] «En 2021 los incendios forestales provocaron una devastación generalizada y se superaron los nuevos récords regionales de emisiones de gases de efecto invernadero,» Copernicus, 2021.
- [6] «Canada produced 23% of the global wildfire carbon emissions for 2023,» Copernicus, 2023. [En línea]. Available: <https://atmosphere.copernicus.eu/copernicus-canada-produced-23-global-wildfire-carbon-emissions-2023>. [Último acceso: 2 Febrero 2025].
- [7] «Avión anfibio Tipo 1 (FOCA),» Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/extincion/avionanfibio.html>. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [8] V. S. Tiina, «Los fuegos forestales y la plataforma mundial sobre el fuego,» Division de Actividad Forestal, 2022.
- [9] «La superficie forestal afectada durante 2024 equivale al 53% de la media de la última década,» Ministerio del Interior, 13 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.interior.gob.es/opencms/es/detalle/articulo/La-superficie-forestal-afectada->

- durante-2024-equivale-al-53-de-la-media-de-la-ultima-decada/. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [10] «¡Sorprendente! Esto pasó cuando un rayo cayó sobre las llamas de un incendio provocado por un rayo anterior,» Meteored, 22 Junio 2024. [En línea]. Available: <https://www.meteored.com.ar/noticias/actualidad/sorprendente-esto-paso-cuando-un-rayo-cayo-sobre-las-llamas-de-un-incendio-provocado-por-un-rayo-anterior.html>. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [11] «Aumenta el riesgo de incendios forestales,» Gaceta UNAM, 25 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.gaceta.unam.mx/aumenta-el-riesgo-de-incendios-forestales/>. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [12] «Bosques: Los peores incendios forestales de la Península Ibérica,» WWF, [En línea]. Available: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/bosques/incendios_forestales_/los_peores_incendios_forestales_en_espana/?utm_source. [Último acceso: 16 Febrero 2025].
- [13] K. Gholz, «Effects of high- and low-intensity fires on soil properties and plant growth,» Plancankluwe, Florida, 2001.
- [14] A. L. Andoni, B. V. David, M. D. Clara, Q. E. Marta y E. A. Silvia, «The Effects of Fire Intensity on the Biochemical Properties of a Soil Under Scrub in the Pyrenean Subalpine Stage,» Huesca, 2024.
- [15] J. M. Solera y C. Guerrero, «Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas,» Alicante, 2007.
- [16] J. M. Solera, «Alteraciones físicas, químicas y biológicas en,» Alicante, 1999.
- [17] J. N, J. Spangenberg, A. Miller, A. Jordán, L. Zavala, P. González y V. González, «Wildfire effects on lipid composition and hydrophobicity of bulk soil and soil size fractions under Quercus suber cover,» Sevilla, 2017.
- [18] «Investigan compuestos orgánicos que impiden la infiltración de agua en el suelo tras el incendio de Doñana,» Ministerio de ciencia, innovación y universidades, [En línea]. Available: https://www.iras.csic.es/es/investigan-compuestos-organicos-que-impiden-la-infiltracion-de-agua-en-el-suelo-tras-el-incendio-de-donana/?utm_source=chatgpt.com. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [19] M. M. Cristina, «Pyrogeography of the Iruelas Valley (Ávila),» Ávila, 2020.
- [20] P. V. Regina, O. Imma, M. H. Sinátora, H. Mundayatan, S. M. Naomi y M. S. Tadeu, «Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna,» springer, 2010.
- [21] V. F. García, E. Marcos, M. F. Guisuraga, A. Taboada, L. Calvo y S. S. Seoane, «Impact of burn severity on soil properties in a Pinus pinaster ecosystem immediately after fire,» 2019.
- [22] M. Alcañiz, L. Outeiro, M. Francos y F. Úbeda, «Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest,» Torroella, 2016.
- [23] V. Carrión-Paladines, M. B. Hinojosa, Á. L. Jiménez, R.-B. Fabián, Q. L. Correa y G.-R. Roberto, «Effects of the Severity of Wildfires on Some Physical-Chemical Soil Properties in a Humid Montane Scrublands Ecosystem in Southern Ecuador,» MDPI, 2022.

- [24] «El biocarbón, obtenido a partir de restos vegetales, un fertilizante que dura en el suelo cientos de años,» Horto, [En línea]. Available: <https://hortoinfo.es/el-biocarbon-obtenido-a-partir-de-restos-vegetales-un-fertilizante-que-dura-en-el-suelo-cientos-de-anos/>. [Último acceso: 3 Febrero 2025].
- [25] J. Mataix-Solera, C. Guerrero, G. O. Fuensanta, P. T. Gema y M-Barcenas, «Forest Fire Effects on Soil Microbiology,» Alicante, 2009.
- [26] H. Doerr y C. S. a. Stefan, «Fire effects on soils: the human dimension,» The Royal Society, Swansea, 2016.
- [27] Z. C. Reyes y A. Jordan, «Efectos del Fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo,» Coimbra, 2014.
- [28] F. Ignacio, M. Narkis, O. Luis, S. Javier y M. M. G. y. Gloria, «Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales,» Universidad de Chile, Santiago, 2010.
- [29] B. R. García, «La Comunidad inicia la restauración forestal con la plantación de 4.300 ejemplares de especies autóctonas en Calblanque,» *SER*, 21 Marzo 2025.
- [30] «La Comunidad inicia la restauración forestal con la plantación de 4.300 ejemplares de especies autóctonas en Calblanque,» *SER*, 21 Marzo 2025. [En línea]. Available: <https://cadenaser.com/murcia/2025/03/21/la-comunidad-inicia-la-restauracion-forestal-con-la-plantacion-de-4300-ejemplares-de-especies-autoctonas-en-calblanque-radio-cartagena/>. [Último acceso: 22 Marzo 2025].
- [31] «Funciones de los fertilizantes NPK,» Fagro, 07 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://blogdefagro.com/informacion/funciones-de-los-fertilizantes-npk-en-las-plantas-y-su-potencializacion-con-enraizadores/>. [Último acceso: 22 Marzo 2025].
- [32] M. J. A. Pule, A. S. X. Mafla y G. P. A. Chávez, «Mejoramiento de suelos afectados por incendios forestales usando microbiota de suelos nativos,» Universidad Católica del Ecuador, Ibarra, 2017.
- [33] C. Fernández, V. José, T. Fontúrbel y P. Arbones, «Eficacia de los tratamientos de estabilización del suelo después de incendio en Galicia,» Andavira, Santiago de Compostela, 2019.
- [34] F. F. Cristina, A. V. José, T. Fonturbel y P. Arbones, «Eficacia de los tratamientos de estabilización del suelo después de incendio en Galicia,» 2019.
- [35] Acevedo-Ororio y Á. E. Cortes-Prieto, «Efectividad de cuatro prácticas agroecológicas de conservación de suelos, frente a procesos erosivos hídricos en Guasca - Cundinamarca,» Revista Lasallista de Investigación, Guasca-Cundinamarca, 2019.
- [36] A. Baena, «Montes de Vigo experimentan con barreras de tela especial,» *Atlántico*, 25 Octubre 2017.
- [37] C. Tatiana, A. Rodríguez y P. Escobar, «Impacto del biocarbón en el suelo agrícola,» San Agustín, 2021.
- [38] M. Saavedra, C. Alcántara y S. Sánchez, «Cultivo de especies autóctonas para revegetación,» Junta de Andalucía, Sevilla, 2010.

- [39] D. Castro, «Hidrosiembras para conservación de suelos,» Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008.
- [40] «Hidrosiembras para conservación de suelos,» Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2008.
- [41] (. G. d. C. UJA, «La reforestación participativa en la Sierra de Cazorla se salda con la plantación de 800 plantas,» *Diario Digital*, 17 Enero 2012.
- [42] «La reforestación participativa en la Sierra de Cazorla se salda con la plantación de 800 plantas,» *Diario digital de la universidad de Granada*, 17 Enero 2012.
- [43] M. Márquez y G. Á. y. V. Troncoso, «La restauración del incendio de Las Peñuelas (Parque Natural de Doñana): Planificación, diseño y ejecución de actuaciones para la recuperación de la vegetación,» Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2022.
- [44] «Siembra ecologista para recuperar la zona del gran incendio de Doñana,» *diariodehuelva.es*, 1 Diciembre 2019.
- [45] V. H. Alejandro, «Evaluación de la eficiencia de encapsulación de urea en alginato de calcio y su tasa de liberación,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2024.
- [46] T. L. M. Llive, «Empleo de subproductos de la industria yerbatera en el desarrollo de sistemas de encapsulación para la liberación controlada de fertilizantes,» Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, 2018.
- [47] «De incendios a bosques: la ONU reconoce la iniciativa de restauración más amplia en todo el Mediterráneo,» ONU programme de medio ambiente, 2024. [En línea]. Available: <https://www.decadeonrestoration.org/es/de-incendios-bosques-la-onu-reconoce-la-iniciativa-de-restauracion-mas-amplia-en-todo-el>. [Último acceso: 24 Marzo 2025].
- [48] «De incendios a bosques: la ONU reconoce la iniciativa de restauración más amplia en todo el Mediterráneo,» ONU programa para el medio ambiente, 13 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.decadeonrestoration.org/es/de-incendios-bosques-la-onu-reconoce-la-iniciativa-de-restauracion-mas-amplia-en-todo-el>. [Último acceso: 26 Marzo 2025].
- [49] Amazon, [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Retroiluminada-fertilidad-Temperatura-Ambiental-Agricultura/dp/B0DHRRRPS8/?_encoding=UTF8&pd_rd_w=p4If7&content-id=amzn1.sym.8e0b9c93-ce4d-43a7-92b8-93ac944c3311%3Aamzn1.symc.fc11ad14-99c1-406b-aa77-051d0ba1aade&pf_rd_p=8e0b9c93-ce4d. [Último acceso: 23 Marzo 2025].
- [50] Amazon, 2025. [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Uzoli-Medidor-Suelo-Dispositivo-Reutilizable/dp/B0DK34K7KZ/?_encoding=UTF8&pd_rd_w=p4If7&content-id=amzn1.sym.8e0b9c93-ce4d-43a7-92b8-93ac944c3311%3Aamzn1.symc.fc11ad14-99c1-406b-aa77-051d0ba1aade&pf_rd_p=8e0b9c93-ce4d-43a7-92b8-93ac. [Último acceso: 23 Marzo 2025].
- [51] Amazon, 2025. [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Germinacion-Germinaci%C3%B3n-Invernaderos-Invernadero-Crecimiento/dp/B0CSFN8L5T/?_encoding=UTF8&pd_rd_w=MpwhX&content-id=amzn1.sym.494a85c7-7e24-4e5b-bc95-515484759460%3Aamzn1.symc.9b8fba90-e74e-4690-b98f-edc36fe735a6&pf_rd_p=494a85c. [Último acceso: 23 Marzo 2025].

- [52] Nabertherm, [En línea]. Available: <https://nabertherm.com/es>. [Último acceso: 23 Marzo 2025].
- [53] Zucconi, «Fitotoxicidad,» 1985.
- [54] «Contact angle goniometer,» Ossila, [En línea]. Available: <https://www.ossila.com/products/contact-angle-goniometer>. [Último acceso: 2 Abril 2025].
- [55] W. S, A. Kurnain, F. Nata y M. Asyari, «Investigation of post-fire peatland natural recovery,» Ecological engineering and environmental technology, Kalimantan, 2024.
- [56] Y. Gao, A. Suo, M. Gao, Y. Wang y X. C. F. y. Liu, «Effects of different fire severities on soil organic carbon components of pinus yunnanensis forest in Lushan forest farm,» Sichuan, 2023.
- [57] A. Bogorodskaya, E. Kukavskaya, O. Kalenskaya y L. Buryak, «Changes in the microbiological and physicochemical properties of soils after fires in pine and birch forests in the central part of the Zabaikalsky Krai,» Euroasian Soil Science, 2023.
- [58] M. Lucas-Borja, C. Fernández, P. Plaza-Álvarez, B. Carrá y D. Zema, «Variability of soil properties with fire severity in pine forests and reforested areas under mediterranean conditions,» Journal of hydrology and hydromechanics, 2022.
- [59] R. A. y. A. Agbeshie, «Impact of fire-burn on soil geochemical, microbial biomass and carbon,» International Journal of Environmental Science and Technology, 2024.
- [60] F. Zucconi, A. Monaco y M. F. y. M. D. Bertoldi, «Phytotoxins during the stabilization of organic matter,» Gasser JKR, Elsevier, London, 1985.
- [61] R. D. Rey, A. Moldes y M. B. y. F. Díaz-Fierros, «Toxicity of Anllóns river sediment extracts using microtox and the Zucconi phytotoxicity test,» Springer Science and Business Media, Santiago de Compostela, 2008.
- [62] E. Emino y P. Warman, «Biological assay for compost quality,» Compost Sci Util, 2004.
- [63] T. Germán, «Índice de Germinación de Zucconi, la prueba más usada para saber la madurez de un compost,» Compostando Ciencia, 09 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.compostandociencia.com/2013/12/test-de-zucconi-o-indice-de-germinacion-de-un-compost-html/>. [Último acceso: 11 Febrero 2025].
- [64] P. A. García-Chevesich, «Efectos del suelo en el recurso suelo,» Department of Agricultural and byosystems engineering, Arizona.
- [65] F. Zucconi, A. Monaco, M. Forte y M. D. Bertoldi, «Phytotoxins during the stabilization of organic matter,» Gasser JKR, Elsevier, London, 1985.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Este trabajo explora una problemática profundamente actual y relevante, desde diversas perspectivas que abarcan lo ambiental, lo económico y lo social, subrayando la necesidad imperiosa de actuar con eficacia en la recuperación de suelos afectados por incendios forestales.

En primer lugar, desde una perspectiva ambiental, los hallazgos de esta investigación aportan una visión crítica sobre cómo los incendios afectan a la estructura y fertilidad del suelo, dificultando enormemente su capacidad natural para regenerarse. Los resultados obtenidos ofrecen pistas valiosas sobre cómo estos suelos, tras verse sometidos a condiciones extremas, pierden nutrientes esenciales y presentan fenómenos perjudiciales como la hidrofobicidad. La introducción y evaluación de soluciones innovadoras como la encapsulación de nutrientes supone una oportunidad real y prometedora para mitigar estos efectos negativos, facilitando una recuperación más ágil y efectiva de ecosistemas degradados. Al profundizar en la problemática específica del suelo afectado, se abre un abanico amplio de posibilidades para intervenciones futuras mejor fundamentadas y dirigidas.

Desde el punto de vista económico, la recuperación efectiva de terrenos quemados tiene implicaciones significativas. En primer lugar, una recuperación más rápida implica una menor pérdida económica para las actividades agrícolas y forestales locales, cuyo sustento depende directamente de la salud del suelo. La implementación eficaz de técnicas de restauración innovadoras podría reducir considerablemente los costos a largo plazo, tanto públicos como privados, dedicados a tareas de rehabilitación y manejo del suelo tras incendios forestales. De este modo, no solo se asegura una gestión más eficiente de los recursos disponibles, sino que también se protege la productividad económica futura de las áreas afectadas.

Finalmente, en lo social, este trabajo impacta directamente en la calidad de vida de las comunidades que dependen y habitan en áreas vulnerables a incendios. Restaurar eficazmente un ecosistema dañado no solo implica la recuperación de la flora y fauna locales, sino también la restauración de servicios ecosistémicos fundamentales como la regulación hídrica, el control natural de la erosión y el mantenimiento de una biodiversidad saludable. A su vez, estos beneficios repercuten positivamente en la percepción pública sobre la importancia del medio ambiente, potenciando una conciencia colectiva que puede incentivar la participación activa y responsable en la protección y gestión sostenible de los recursos naturales.

En conjunto, este trabajo no se limita a presentar una solución técnica específica, sino que plantea una discusión integral sobre las múltiples dimensiones implicadas en la restauración ecológica de suelos quemados. La combinación de hallazgos científicos con implicaciones prácticas y directas permite considerar estrategias futuras más amplias y eficaces, consolidando una base sólida para intervenciones más profundas y sostenibles en escenarios reales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Este trabajo no solo aborda aspectos técnicos y científicos sobre la recuperación de suelos afectados por incendios, sino que también invita a una reflexión profunda sobre los dilemas éticos y las responsabilidades sociales implicadas en la gestión del medio ambiente. La necesidad de intervenir activamente en la restauración ecológica tras un desastre natural plantea cuestiones significativas acerca del rol humano en la conservación y recuperación de los ecosistemas.

Desde una perspectiva ética, la intervención humana en áreas naturales degradadas implica asumir una responsabilidad directa frente al deterioro ambiental. Este trabajo promueve un enfoque responsable y consciente, poniendo de relieve que las decisiones y técnicas aplicadas no pueden desligarse de valores fundamentales como el respeto hacia la biodiversidad, el equilibrio ecológico y la sostenibilidad. A lo largo del estudio, se evidencia cómo ciertas decisiones técnicas, como el uso de cápsulas de nutrientes, plantean consideraciones éticas sobre la mejor manera de intervenir para lograr la regeneración sin generar efectos adversos secundarios.

Además, la dimensión social juega un papel crucial en este debate ético. Las comunidades afectadas por incendios no solo experimentan pérdidas materiales inmediatas, sino también impactos más profundos sobre su identidad, cultura y modos de vida, especialmente cuando estos están estrechamente ligados a los recursos naturales locales. Este trabajo subraya la importancia de involucrar a estas comunidades en los procesos de restauración ecológica, asegurando que las soluciones sean culturalmente adecuadas y socialmente aceptadas.

Otro punto esencial en la reflexión ética y social es la equidad en la distribución de recursos destinados a la recuperación ambiental. Este estudio invita a considerar cómo las acciones de restauración deben beneficiar equitativamente a todos los actores involucrados, evitando que ciertos grupos sociales, especialmente aquellos más vulnerables, se vean desfavorecidos o excluidos de los beneficios generados.

Finalmente, este trabajo también destaca la responsabilidad educativa y divulgativa de los investigadores y técnicos implicados. Comunicar claramente los hallazgos, implicaciones y limitaciones de los métodos estudiados no solo fortalece la transparencia científica, sino que además promueve una mayor conciencia pública sobre la relevancia de proteger y restaurar nuestro entorno natural. Esta sensibilización social es fundamental para asegurar un compromiso comunitario duradero con la conservación y la gestión sostenible del medio ambiente.

En síntesis, la realización de este trabajo invita a un debate ético y social profundo y necesario, que va más allá de las soluciones técnicas puntuales, destacando la importancia de tomar decisiones informadas, responsables y participativas en la gestión del entorno natural afectado por incendios forestales.