

Adaptación al cambio climático de pinares mediterráneos de *Pinus halepensis*: resultados del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO

Lourdes Vicente Valero¹
Esteban Jordán González²

¹Ingeniero técnico forestal. Ingeniería del Entorno Natural

²Ingeniero de montes. Ingeniería del Entorno Natural

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809) ha desarrollado y validado metodologías innovadoras de gestión forestal adaptativa orientadas a fortalecer la resiliencia de los pinares mediterráneos dominados por *Pinus halepensis* frente a los efectos del cambio climático (Fig.1). Entre 2020 y 2025 se ejecutaron 42 rodales demostrativos (205 ha) distribuidos en siete provincias del arco mediterráneo español. Las actuaciones incluyeron migración asistida, selvicultura ecohidrológica, tratamientos de diversificación estructural y gestión adaptativa postincendio.

Los resultados evidencian incrementos significativos en la eficiencia hídrica, la diversidad florística y la estabilidad estructural de las masas, validando el enfoque adaptativo como modelo replicable para la política forestal mediterránea. Además, el proyecto ha generado conocimiento técnico transferible mediante herramientas digitales, guías metodológicas y protocolos normalizados, que permiten integrar la adaptación climática en la gestión forestal.

Estos avances posicionan a los pinares de *P. halepensis* como modelo de referencia para la restauración y adaptación de ecosistemas semiáridos frente a perturbaciones climáticas cada vez más intensas.

Palabras clave: Gestión forestal adaptativa, *Pinus halepensis*, cambio climático, ecohidrología, migración asistida.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales mediterráneos enfrentan un proceso de

pérdida progresiva de funcionalidad ecológica debido a la intensificación de los impactos del cambio climático.



Fig. 1. Masa de pinar del Monte Castellar y Los Hermanillos de Librilla afectado por sequía.

El aumento de las temperaturas, la irregularidad de las precipitaciones y la mayor frecuencia de sequías, incendios y plagas están alterando los equilibrios naturales y comprometiendo la sostenibilidad de las masas forestales. En este contexto, los pinares de *Pinus halepensis* —una de las formaciones más características del Mediterráneo ibérico— muestran síntomas de decaimiento generalizado, especialmente en áreas de baja altitud y alta aridez.

Frente a este escenario, la Gestión Forestal Adaptativa (GFA) surge como un enfoque esencial para garantizar la resiliencia y funcionalidad de los ecosistemas. Este modelo integra la planificación basada en el conocimiento científico, la gestión flexible y el aprendizaje continuo, permitiendo ajustar las intervenciones según la evolución de las condiciones ambientales y la respuesta de las masas forestales. Así, la GFA se convierte en una herramienta fundamental para anticipar, mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático.

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se enmarca en esta estrategia, proponiendo actuaciones piloto que demuestran cómo la adaptación climática puede integrarse en la planificación forestal. Su desarrollo responde a las directrices de la Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático (2021), la Nueva Estrategia Forestal de la UE (2023) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC 2021–2030), en consonancia con los objetivos del Pacto Verde Europeo y la Agenda 2030.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto fue desarrollar, aplicar y validar metodologías demostrativas de gestión adaptativa en pinares mediterráneos para incrementar su resiliencia frente a los impactos del cambio climático, especialmente ante eventos extremos de sequía e incendio.

Los objetivos específicos fueron:

- Desarrollar un sistema de diagnóstico y alerta temprana del decaimiento forestal basado en tele-

detección multitemporal y análisis ecofisiológico.

- Aplicar tratamientos selvícolas adaptativos (reducción de densidad, diversificación estructural, gestión postincendio) para mejorar la eficiencia hídrica y la estabilidad estructural.
- Ensayar estrategias de migración asistida, introduciendo procedencias genéticamente adaptadas a escenarios climáticos futuros.
- Evaluar los efectos de las actuaciones sobre variables ecológicas, hidrológicas y estructurales.
- Transferir los resultados mediante herramientas digitales, guías técnicas y actividades formativas orientadas a gestores y administraciones.

3. SOCIOS

El consorcio del proyecto ha estado formado por entidades con amplia experiencia en gestión y restauración forestal:

- Ingeniería del Entorno Natural (IDEN) —coordinador del proyecto.

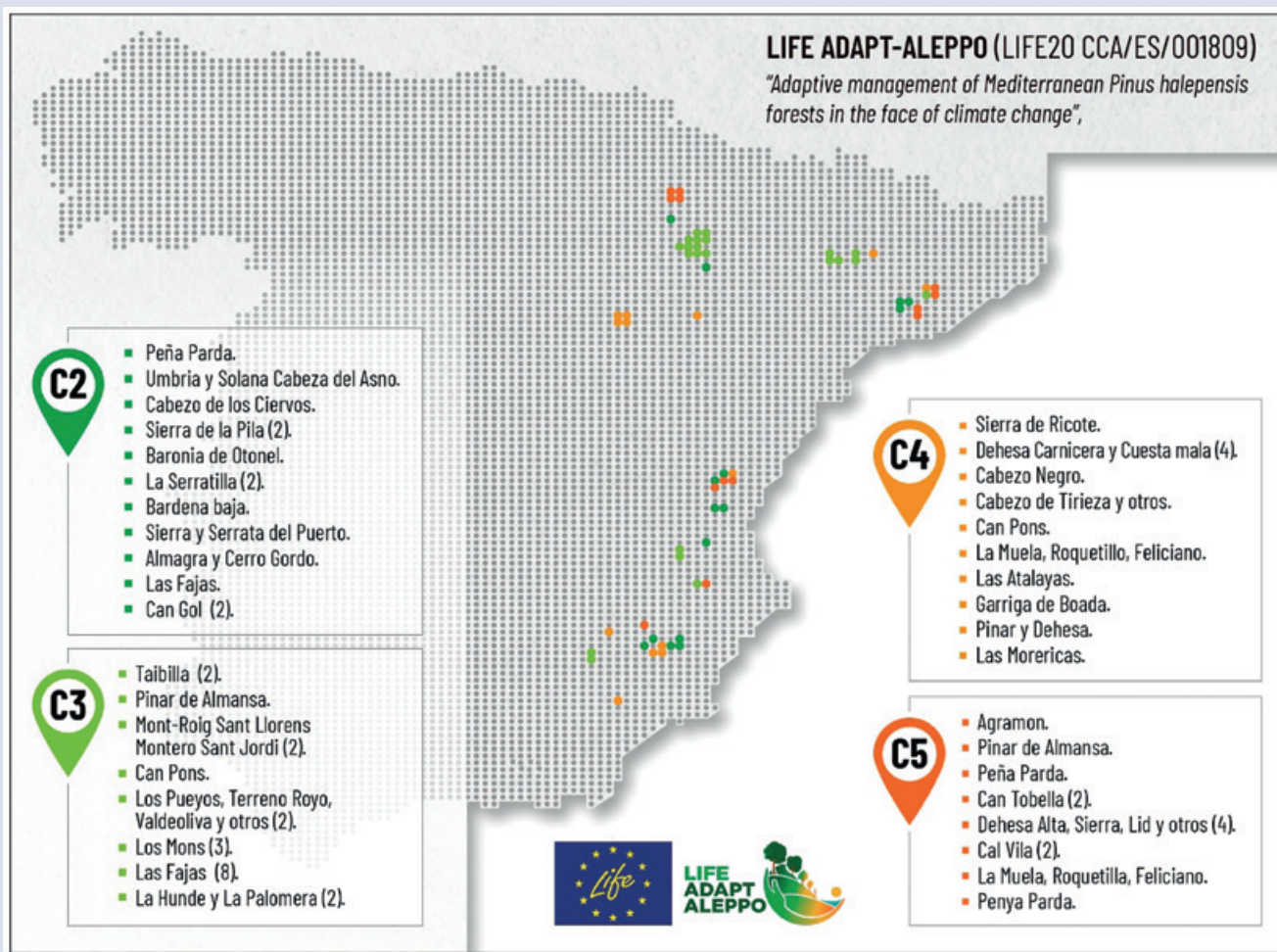


Fig. 2. Ubicación de los rodales demostrativos LIFE Adapt-aleppo.

- Dirección General de Patrimonio Natural y Acción Climática de la Consejería de Medio Ambiente, Universidades, Investigación y Mar Menor (CARM).
- Agresta Sociedad Cooperativa — especializada en teledetección y SIG.
- Universitat Politècnica de València (UPV).
- Universitat de Lleida (UdL).
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

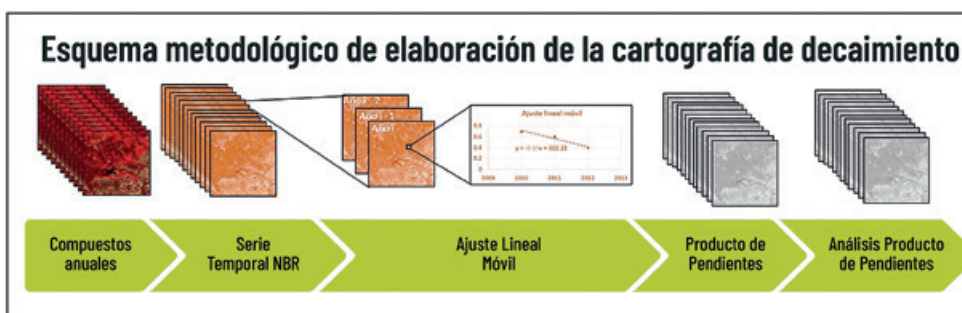
4. ÁMBITO DE ACTUACIÓN

El ámbito geográfico del proyecto abarca la distribución potencial del hábitat 9540 (subtipo 42.841) de *Pinus halepensis* en la península ibérica, incluyendo las vertientes mediterráneas de los sistemas catalán, ibérico y prebético.

Se establecieron 42 rodales demostrativos en 205 hectáreas, distri-



Fig. 3. Esquema de trabajo para elaboración de cartografía de idoneidad del hábitat.



buidos en las regiones de Murcia, Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana y Castilla-La Mancha tal y como se muestra en la Fig.2.

5. ACCIONES DEL PROYECTO Y RESULTADOS

5.1. Acciones preparatorias

A1. Diagnóstico y experiencias previas

Durante los primeros meses se constituyó un Comité Técnico Asesor integrado por 28 expertos en materias clave de la gestión adaptativa del pino carrasco. Paralelamente se realizó un inventario y análisis de 63 experiencias previas en España sobre técnicas y herramientas de gestión forestal adaptativa; de ese conjunto se seleccionaron 20 para su seguimiento detallado, con el objetivo de capitalizar lecciones aprendidas y estandarizar metodologías de referencia.

A2. Selección de rodales demostrativos

Se efectuó un diagnóstico territorial para seleccionar 42 rodales atendiendo a características bioclimáticas, historial de incendios y pla-

gas y disponibilidad hídrica, así como criterios de accesibilidad y representatividad. La selección se acompañó de acuerdos de compromiso con las administraciones titulares o gestoras, necesarios para la autorización de los trabajos.

5.2. Acciones concretas y de monitoreo

Las acciones C se implementaron en campo con carácter demostrativo, generando conocimiento replicable en otros territorios mediterráneos. El seguimiento (acciones D) permitió evaluar rigurosamente su desempeño y resultados.

C1. Mapeo de idoneidad del hábitat y herramienta de decaimiento

Se elaboró cartografía de idoneidad de hábitat (situación actual y futura) para identificar zonas vulnerables y áreas prioritarias de actuación, siguiendo el esquema de la Fig.3.

La metodología incluye modelización y análisis de series temporales de imágenes satelitales para detectar procesos de decaimiento, conforme a la Fig.4.

El proyecto desarrolló además una herramienta web interactiva para visualización y consulta, disponible en: <https://lifeadaptaleppo.agrestaweb.org>.

Esta herramienta constituye un avance tecnológico replicable que facilita la toma de decisiones basada en evidencia y exige su integración en la planificación y en las políticas públicas a distintas escalas.

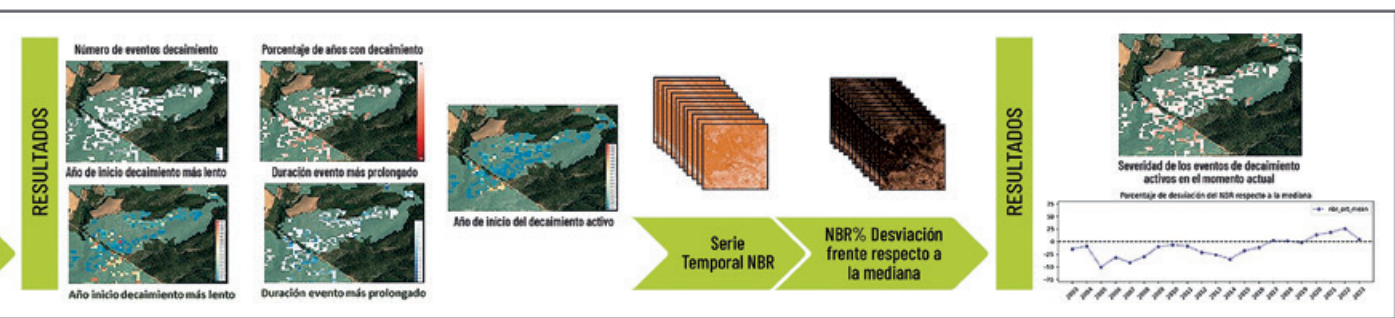
C2. Migración asistida en restauración forestal

Se definió un protocolo de selección de procedencias y un protocolo operativo por rodal para 12 áreas situadas en Murcia, Valencia, Castellón, Barcelona y Zaragoza.

La estrategia consistió en plantar ejemplares de *Pinus halepensis* de distintas regiones de procedencia, incluyendo materiales adaptados a condiciones más secas y cálidas, en zonas preseleccionadas que serán más adecuadas en escenarios futuros. Con ello se persigue mejorar el conocimiento de la respuesta poblacional ante el clima esperado y favorecer poblaciones más resilientes a largo plazo.



Fig. 4. Esquema de trabajo para modelización de imágenes satelitales.



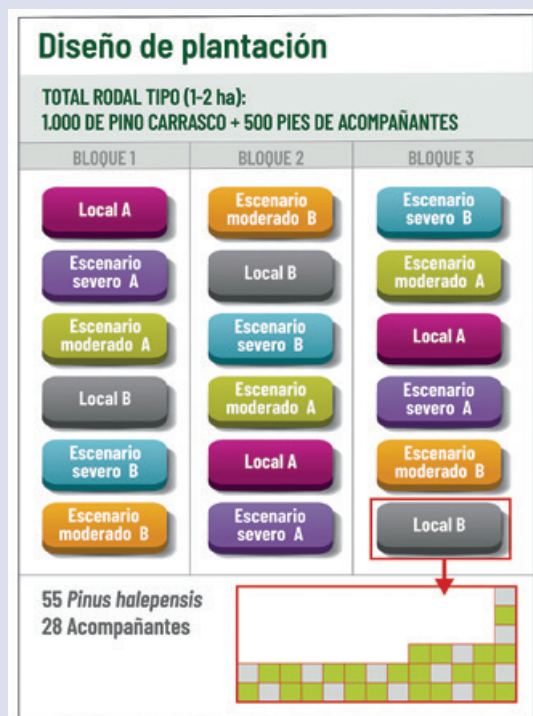


Fig. 5. Diseño general de plantación en parcelas de migración asistida.

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO ha desarrollado actuaciones de migración asistida en dos tipos de sistemas forestales:

- Sistemas forestales de pino carrasco degradados: plantaciones continuas por bloques o hileras
- Sistemas forestales de pino carrasco envejecidos sin presencia de regenerado, y con oquedades: plantación aleatoria

Se plantaron 60 ha distribuidas en 12 rodales, empleando 2 procedencias locales, 2 para escenario moderado y 2 para escenario severo en cada área de plantación según esquema de la Fig.5; además, se incorporaron especies leñosas acompañantes en función del cortejo florístico y de las condiciones bioclimáticas de cada zona.

Se han plantado un total de más de 15 000 ejemplares de pino carrasco de 12 procedencias (Ibérico Aragonés (ES05), Monegros-Depresión del Ebro (ES06), La Mancha (ES08), Maestrazgo-Los Serranos (ES09), Levante interior (ES10), Costa Levantina (ES11), Sureste (ES13), Bética Norte (ES14), Bética Sur (ES15), Cazorla (ES16), Sur (ES17) y Alaquas), además de más de 5000 ejemplares de especies acompañantes autóctonas. En la Fig.6 se mues-

tran imágenes tomadas durante los trabajos de plantación.

El seguimiento mostró que Levante interior y Alaquàs (material de mejora genética

del huerto semillero clonal de Alaquàs) presentaron mejor supervivencia y crecimiento; las procedencias locales solo destacaron en 3 de 9 parcelas.

Con base en estos resultados, se cuestiona el uso exclusivo de procedencia local y se propone mezcla de procedencias en restauración para anticipar el desplazamiento climático.

C3. Selvicultura adaptativa de base ecohidrológica

Con el Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se han desarrollado distintos tipos de tratamientos selvícolas, con el fin de valorar el tipo de tratamiento y densidades finales óptimas para lograr los mayores beneficios ecohidrológicos de la masa. Así, se han llevado a cabo actuaciones en 9 rodales localizados a lo largo de la cuenca mediterránea, haciendo tratamientos selvícolas de reducción de la densidad por calles o fajas, por bosquetes y cortas homogéneas.

Así, se han llevado a cabo tratamientos para la reducción controlada de la densidad de árboles para mejorar la infiltración de agua, reducir la escorrentía y la erosión, favorecer la recarga de acuíferos y disminuir la propagación de incendios. Aplicado en 9 rodales y un total de 44 ha, con distintos métodos de selvicultura: por calles, por bosquetes y cortas homogéneas. En la Fig.7 se muestra la ubicación y características de estos rodales.



Fig. 6. Imágenes tomadas durante los trabajos de plantación de migración asistida.

Los resultados de seguimiento muestran que las parcelas tratadas presentan mayor agua sobrante y recarga de acuíferos. En Sierra de Luna se registró un +33 % de agua disponible respecto a la parcela control y en Nerpio, los aclarados por bosquetes incrementaron la recarga de manera más eficaz que los tratamientos homogéneos.

También se constató disminución del estrés hídrico y aumento de la eficiencia en el uso del agua (EUA); en la mayoría de los casos, NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y otros indicadores de vigor aumentaron entre un 10–20 % tras la intervención.

En conjunto, la selvicultura de base ecohidrológica incrementa significativamente la disponibilidad hídrica, favorece la infiltración y eleva la proporción de suelo húmedo en capas profundas, mejorando la resiliencia a la sequía (ver Fig.8).

C4. Selvicultura adaptativa para diversificación florística y estructural

Las actuaciones implementadas en este contexto de mejora de diversificación con fines de mejorar la resiliencia de las masas se engloban en 5 tipologías: tres de ellas buscan fomentar la regeneración del pino carrasco u otras especies, una pretende liberar de competencia a las especies acompañantes del pino, y una última busca mantener y fomentar estructuras de masa irregulares:

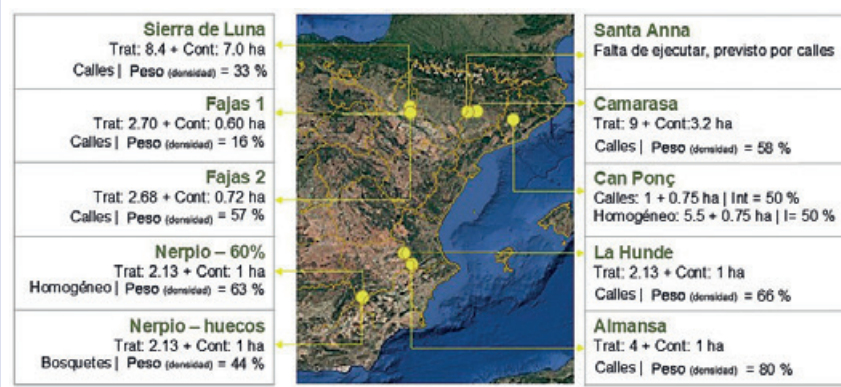


Fig. 7. Ubicación y características de rodales donde se ha aplicado selvicultura de base ecohidrológica.

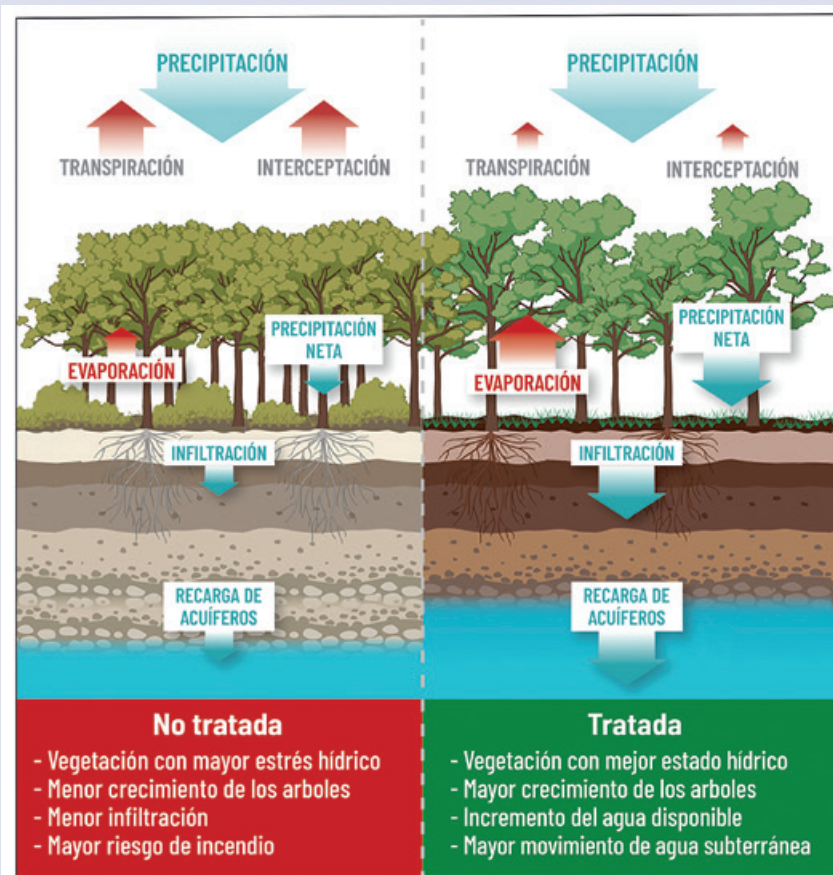


Fig. 8. Características hidrológicas de una misma masa tratada y no tratada.



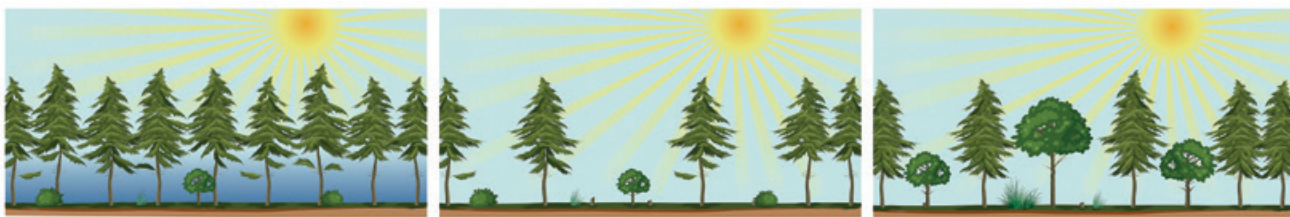


Fig. 9. Esquema representativo de claras selectivas.

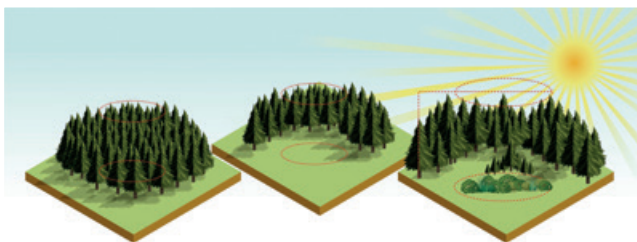


Fig. 10. Esquema representativo de tratamientos selvícolas de regeneración por bosquetes.



Fig. 11. Esquema representativo de entresaca regularizada.

- Claras selectivas y/o mixtas (Fig. 9)
- Tratamientos de regeneración por bosquetes (Fig.10)
- Tratamientos de regeneración por fajas
- Entresaca regularizada (Fig.11)
- Aclareo sucesivo uniforme

Este tipo de tratamientos se han aplicado en 12 rodales y un total de 59 ha, logrando: incremento del Índice de Persistencia en todas las parcelas, aumento de la heterogeneidad estructural y lumínica, fomento de especies vegetales autóctonas con un +35 % medio en el Índice de Shannon del sotobosque (mide la diversidad o riqueza de especies de un ecosistema, en función del número total de especies, proporción relativa de cada especie) y un incremento del número medio de leñosas acompañantes (de 3,1 a 6,8 especies/rodal), además de mejoras microclimáticas y mayor regeneración natural de frondosas.

Todo ello eleva la resiliencia frente a incendios, plagas y otras perturbaciones y configura ecosistemas más equilibrados y resistentes a largo plazo.

C5. Gestión adaptativa post-incendio

En pinares con regeneración natural masiva (hasta 70 000 pies/ha), se aplicaron clareos intensos (>90 % reducción) en 9 rodales (42 ha), para

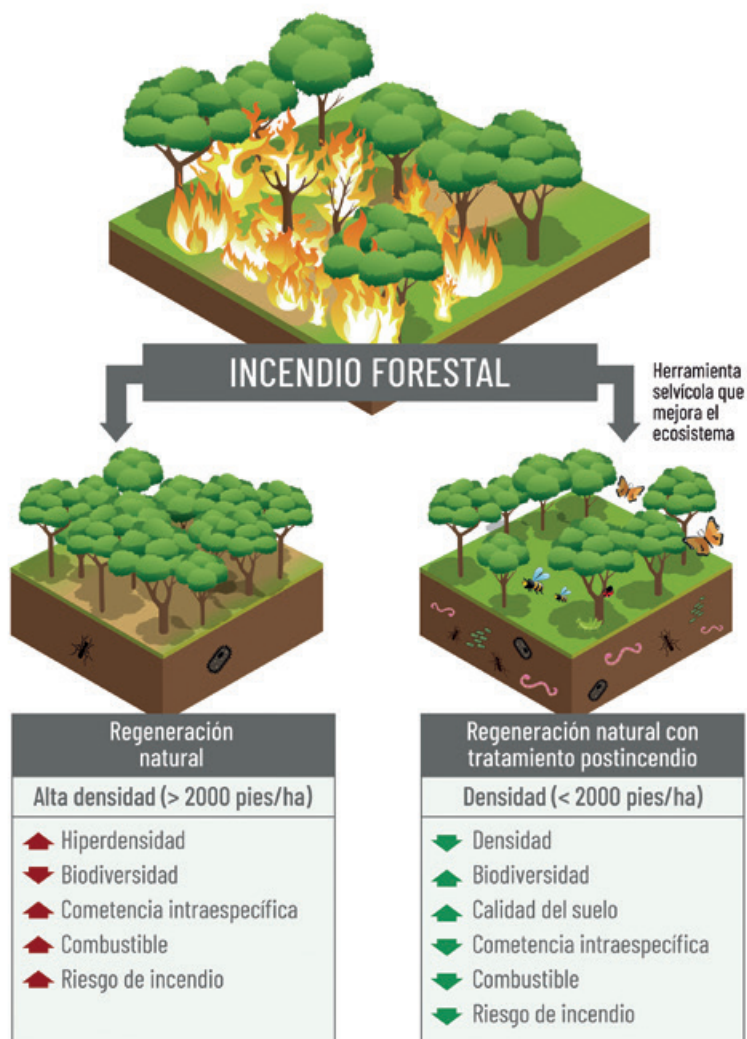


Fig. 12. Comparativa de una masa post-incendio en los casos de "no tratada" y "gestionada".



Fig. 13. Guías técnicas publicadas con el proyecto LIFE Adapt-Aleppo.

disminuir la competencia intraespecífica y reducir el riesgo de futuros incendios.

Se establecieron dos densidades objetivo: 900–1200 pies/ha y 1300–1800 pies/ha.

Tras las actuaciones se observó incremento de diversidad vegetal (Índice de Shannon) y cobertura de matorral en las zonas tratadas, junto con mayor actividad enzimática del suelo (β -glucosidasa y fosfatasa), lo cual evidencia mejora de la calidad edáfica. Este manejo favorece la resiliencia y la capacidad adaptativa postincendio, aumenta biodiversidad y estabilidad ecológica y rehabilita funcionalmente el ecosistema, más allá de la mera recuperación de la cubierta vegetal.

En la Fig.12 se muestran las características de una masa incendiada en los casos de ser tratada y sin gestiona.

C6. Transferencia y replicabilidad

Se ha desarrollado un conjunto de productos para facilitar la transferencia y la replicabilidad:

- Seis guías técnicas para la Adaptación al Cambio Climático en pinares mediterráneos de *Pinus halepensis* que integran de forma sintética los modelos de gestión adaptativa implementados por el proyecto (Fig.13)

Guía técnica “Técnicas de modelización y teledetección para la gestión adaptativa de los pinares ibéricos de pino carrasco”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_01_lr.pdf

Guía técnica “Implementación de la técnica de migración asistida en la restauración forestal del hábitat del pino carrasco”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_02_lr.pdf

Guía técnica “Implementación de la silvicultura ecohidrológica en los pinares ibéricos de pino carrasco”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_03_lr.pdf

Guía técnica “Implementación de técnicas selvícolas de diversificación estructural y florística en los pinares ibéricos de pino carrasco”.

co”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_04_lr.pdf

Guía técnica “Implementación de técnicas de silvicultura adaptativa en regeneración post incendio de pino carrasco”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_05_lr.pdf

Guía Técnica “Evaluación de necesidades para la implementación de gestión adaptativa al cambio climático”. https://adaptaleppo.eu/wp-content/uploads/2025/03/AdaptAleppo-GT_06_lr.pdf

— Catálogo de costes de adaptación para facilitar la toma de decisiones a través de la evaluación de costes y mostrar la relación coste/beneficio de las técnicas demostrativas de gestión adaptativa implementadas en el proyecto LIFE. Se trata de una herramienta online disponible a través de la web del proyecto: <https://adaptaleppo.eu/apps/>

- Numerosas actividades de transferencia: curso de capacitación, reuniones, seminario web con propietarios privados, organización de jornadas de transferencia y replicabilidad, participación en jornadas, participación en consultas públicas sobre gestión forestal adaptativa de ámbito nacional y UE, sesiones de trabajo con grupos relacionados con gobernanza en materia forestal y adaptación al cambio climático (visitas de campo), firma de 10 acuerdos de colaboración con agentes públicos y privados e implementación de soluciones adaptativas en proyectos y planes.

El trabajo de transferencia y replicabilidad ha dado sus frutos, logrando replicar las metodologías aprendidas en numerosos proyectos y planes de ordenación a lo largo de la cuenca mediterránea.

5.3. Acciones de divulgación

A lo largo del proyecto se han desarrollado numerosas actividades divulgativas, de networking, difusión técnica y sensibilización:



1

Fig. 14. Imágenes tomadas durante actividades de divulgación del proyecto LIFE Adapt-Aleppo (1. Exposición itinerante en Murcia; 2. Jornada técnica; 3. Jornada de campo en Lleida).



2



3

- Participación en congresos (Congreso Forestal Español 2022 y 2025, CONAMA)
- Sesiones de trabajo con numerosos proyectos y grupos de trabajo: Life Red Bosques Clima, Life LiveAdapt, Life + REB, Life Agroforadapt, Life WOODforFuture, SIP_ecOadapt50, SilvAdapt, Life Resilient Forest, Life Soria Forest-Adapt, COOPTREE (Forespir), DESFUTUR, AIDIMME, ReDec, etc.
- Más de 20 jornadas y seminarios técnicos sobre gestión adaptativa
- Exposición itinerante (en 9 localizaciones) y exposición virtual (<https://adaptaleppo.eu/acciones/>)
- Entrevistas de radio (SER, LleidaRadio) y revista el Economista
- Publicación de material divulgativo disponible en la web del pro-

yecto (<https://adaptaleppo.eu/multimedia-2/>):

- Publicaciones científicas y técnicas: guías técnicas con metodologías empleadas, artículos técnicos y científicos
- Publicación de newsletter semestral
- Materiales divulgativos: carteles, poster, folletos, etc.
- Canal de vídeos divulgativos: <https://www.youtube.com/@lifeadapt-aleppo8166>

6. IMPACTO LOGRADO

El proyecto ha generado impactos tangibles más allá de las áreas piloto, con replicación en proyectos, planes de ordenación, estrategias de adaptación y manuales de buenas prácticas, apoyados por Next Generation EU, PRTR, FEADER y fondos propios de administraciones.

Un ejemplo de ello son los Manuales de Buenas Prácticas el-

borados por la Red Estatal de Montes Públicos (REMP):

- Prueba de procedencias con *P. halepensis*: <https://remp.es/buenas-practicas/listado/prueba-de-procedencias-con-pinus-halepensis>
- Selvicultura ecohidrológica en *P. halepensis* (Comunitat Valenciana): <https://remp.es/buenas-practicas/listado/selvicultura-eco-hidrologica-en-pinus-halepensis-comunitat-valenciana>
- Gestión adaptativa de la regeneración posincendio (C. Valenciana): <https://remp.es/buenas-practicas/listado/gestion-adaptativa-de-la-regeneracion-posincendio-comunitat-valenciana>

Aplicaciones en proyectos:

- Mejora de Hábitats en la ZEC y ZEPA Sierras de Ricote y La Navela
- Mejora selvícola de masas forestales para la diversificación y el apoyo en su evolución en áreas afectadas por el cambio climático. área noroeste de la Región de Murcia” Lotes 1 y 2
- Proyecto de repoblación forestal en la finca “Cerro Vicente” TM Chinchilla de Monte-Aragón (Albacete)
- DECAPIN-IA CYL. Sistema de Inteligencia Artificial para la detección del decaimiento de Pinus pinaster en Castilla y León

LIFE ADAPT-ALEPPO no solo ha alcanzado sus objetivos, sino que ha multiplicado su impacto gracias

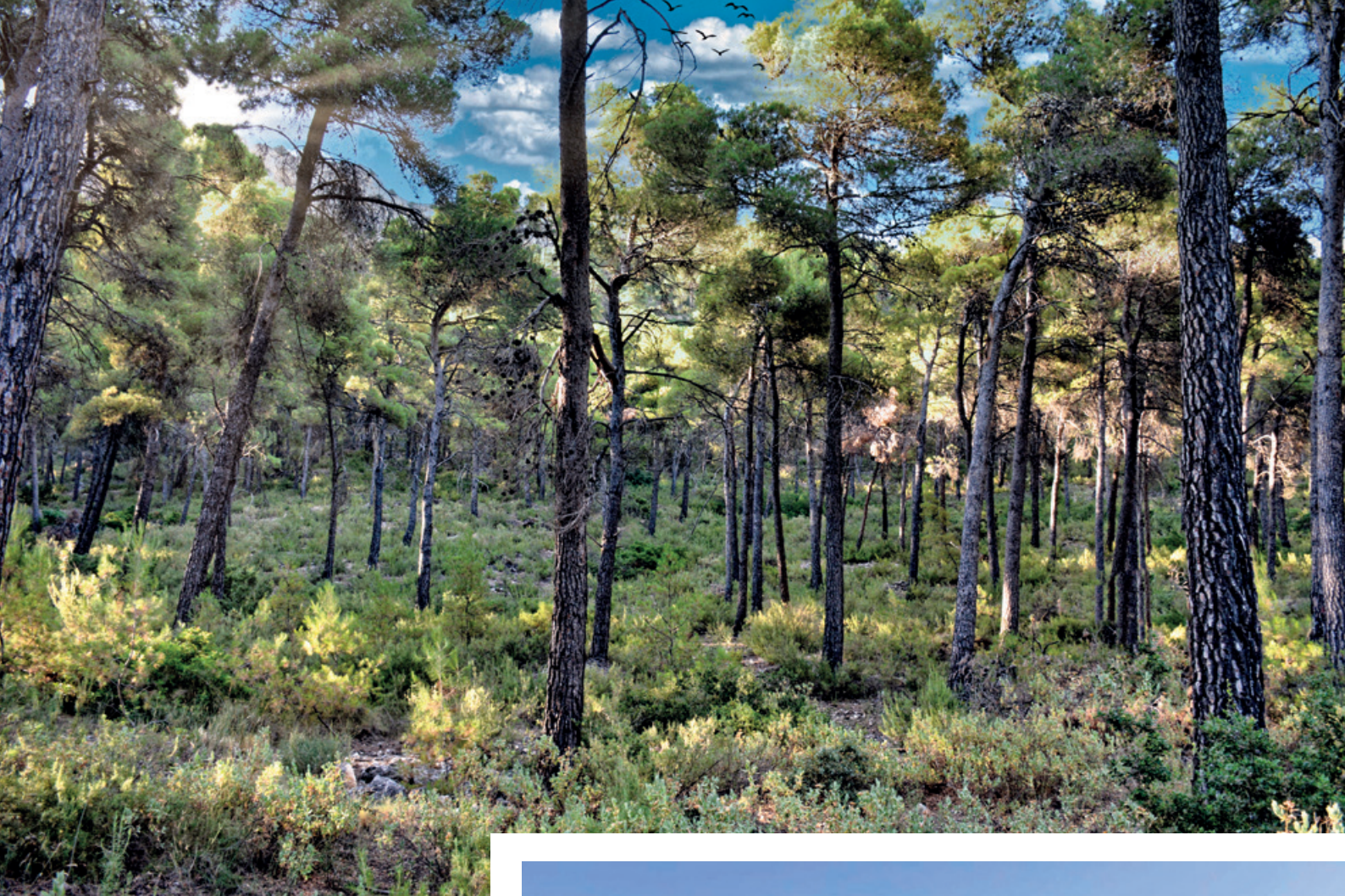


Fig. 15. Estado final de la masa tras aplicar tratamientos de gestión adaptativa.

a la replicación de sus metodologías, logrando beneficios ambientales, sociales y económicos de amplio alcance.

- Replicabilidad técnica
 - Las actuaciones de migración asistida, selvicultura ecohidrológica, selvicultura de diversificación y selvicultura postincendio han sido adoptadas como modelos de referencia.
 - Estas metodologías se han incorporado en planes autonómicos de gestión forestal y en otros proyectos de financiación europea, lo que demuestra su validez científica y operativa.
- Beneficios ambientales
 - Las técnicas aplicadas han generado mayores tasas de supervivencia y resiliencia en pinares de *Pinus halepensis* (Fig.15).
 - Se ha logrado incrementar la captura de CO₂, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
 - Los tratamientos ecohidrológicos han mejorado la eficiencia hídrica, con un aumento de hasta 33 %



Fig. 16. Saca de madera para su aprovechamiento tras trabajos de gestión adaptativa.

en la disponibilidad de agua en parcelas tratadas.

- En zonas postincendio se ha observado un aumento de la diversidad vegetal y de la calidad del suelo, lo que mejora la funcionalidad ecosistémica.
- Impacto socioeconómico
 - La replicación de estas prácticas ha supuesto la generación de

empleo especializado en gestión forestal adaptativa, tanto en el ámbito público como privado.

- Se han abierto nuevas oportunidades para empresas forestales (Fig.16), consultorías ambientales y viveros, gracias a la demanda de material genético adaptado y nuevas técnicas de gestión.



Fig. 17. Equipo de técnicos especialistas en gestión de masas forestales involucrados en el proyecto LIFE Adapt-Aleppo.

- Efecto demostrativo en políticas
 - El proyecto ha servido como referencia para normativas y estrategias nacionales y regionales, en línea con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y las Estrategias Forestales autonómicas (Fig.17).
 - Ha reforzado el papel de los bosques mediterráneos como sumideros de carbono y elementos clave en la resiliencia frente a sequías e incendios.

7. CONCLUSIONES

LIFE ADAPT-ALEPPO demuestra que la gestión forestal adaptativa es una estrategia eficaz y operativa para aumentar la resiliencia de los

pinos mediterráneos frente a sequías, incendios y otras perturbaciones asociadas al cambio climático. El proyecto valida un paquete integrado de soluciones —diagnóstico con teledetección, silvicultura de base ecológica, diversificación estructural y migración asistida— que mejora el funcionamiento de las masas y orienta la toma de decisiones.

Más allá de la mejora directa del vigor y la estabilidad de los rodales, las actuaciones generan cobeneficios sobre la biodiversidad, el suelo y el agua, y refuerzan el papel de estos bosques como sumideros de carbono, alineando la práctica de campo con las políticas de adaptación y mitigación vigentes.

El proyecto deja herramientas listas para uso (visor de detección temprana, cartografía de idoneidad, guías técnicas y catálogo de costes) y protocolos replicables que facilitan su adopción por administraciones y gestores, reduciendo incertidumbre y acelerando la planificación.

En síntesis, la adaptación en pinares mediterráneos exige gestionar para el agua, la diversidad y la estabilidad, apoyándose en datos y evaluación continua. LIFE ADAPT-ALEPPO ofrece una hoja de ruta escalable: pasar del diagnóstico a la acción con manejo adaptativo, seguimiento robusto y transferencia efectiva, consolidando un modelo exportable al conjunto del ámbito mediterráneo.

