



LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809)



IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MIGRACIÓN ASISTIDA EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DEL HÁBITAT DEL PINO CARRASCO

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO está financiado por el Programa LIFE de la Unión Europea bajo el Acuerdo de Subvención LIFE20 CCA/ES/001809.



El contenido incluido en esta guía refleja únicamente la opinión del autor y la Agencia/Comisión Europea no es responsable del uso que pueda hacerse de la información que contiene.

Esta guía forma parte del material de divulgación, transferencia y replicabilidad en el marco de las acciones C6 y E4 del Proyecto LIFE20 CCA/ES/001891- LIFE ADAPT-ALEPPO “Gestión adaptativa de los bosques mediterráneos de *Pinus halepensis* ante el cambio climático”

EDICIÓN:

Dirección General de Patrimonio Natural y Acción Climática de la Comunidad Autónoma Región de Murcia. Ingeniería del Entorno Natural.

REDACCIÓN:

Lourdes Vicente Valero (1), Esteban Jordán González (1), Miguel Chamón Fernández (2), Santiago Martín Alcón (3), Jorge Olivar Ruiz (3), Aitor Ameztegui (4)

(1) Ingeniería del Entorno Natural.

(2) D.G. de Patrimonio Natural y Acción Climática. Región de Murcia.

(3) Agresta Sociedad Cooperativa.

(4) Grupo de Investigación en Dinámica Forestal y Gestión Adaptativa (ADAPTAFOR). Universitat de Lleida

FOTOGRAFÍAS:

Las imágenes adjuntas a este manual han sido tomadas por los autores de la guía.

DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

Jose Juan Rivas Nieto

CITA BIBLIOGRÁFICA:

Vicente, L.; Jordán, E.; Chamón, M.; et al. 2025. Guía técnica “Implementación de la técnica de migración asistida en la restauración forestal del hábitat del pino carrasco”.

DEPÓSITO LEGAL: MU 340-2025

FINANCIADO:

Programa LIFE de la Unión Europea

Esta publicación será reproducible por todos los medios, citando las fuentes y con finalidad no lucrativa.

La información incluida en el presente documento refleja solo la opinión de sus autores, excluyendo a la Agencia/Comisión Europea de cualquier uso que pueda derivarse de ella.



GUÍA TÉCNICA

IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MIGRACIÓN ASISTIDA EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DEL HÁBITAT DEL PINO CARRASCO

1

INTRODUCCIÓN

2

1.1.	ANTECEDENTES	2
1.2.	OBJETIVOS	4
1.3.	GLOSARIO Y CONCEPTOS CLAVE	5

2

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT 42.841 - PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

7

2.1.	ECOLOGÍA DEL HÁBITAT	7
2.2.	DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT	8

3

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

9

4

LA GESTIÓN FORESTAL COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN DE LOS BOSQUES AL CAMBIO CLIMÁTICO

11

5

IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MIGRACIÓN ASISTIDA EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DEL HÁBITAT DEL PINO CARRASCO

12

5.1.	BASES CIENTÍFICO-TÉCNICAS	12
5.2.	SISTEMAS FORESTALES OBJETO DE APLICACIÓN Y RECOMENDACIONES GENERALES	13
5.3.	DESCRIPCIÓN DE MEDIDAS IMPLEMENTADAS EN EL PROYECTO	14
	5.5.1. Diseño de las actuaciones	14
	5.5.2. Protocolo de seguimiento	17
	5.5.3. Resultados	18
	5.5.4. Análisis económico	19
5.4.	RECOMENDACIONES TÉCNICAS	20

6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

20

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El cambio climático está ejerciendo impactos notables en la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas forestales Mediterráneos, impactos que pueden verse acentuados en un futuro próximo. Los escenarios constatan una aceleración en el aumento de las temperaturas, reducciones entre leves y moderadas en las precipitaciones, lo que provocará un aumento general de la aridez. Del mismo modo, se espera una mayor frecuencia de eventos extremos (tanto altas temperaturas como bajas precipitaciones), provocando eventos de sequía más frecuentes y severos. El aumento del estrés hídrico asociado con sequías más prolongadas e intensas puede conducir a cambios en la mortalidad y la regeneración de especies vegetales, afectando al rango actual de distribución de especies de plantas y provocando la desaparición y reemplazo de ciertas especies por otras. Además, se prevé un aumento progresivo en la frecuencia y severidad de ciertas perturbaciones naturales, como es el caso de los grandes incendios forestales y los episodios de plagas y enfermedades, pudiendo provocar grandes cambios en la distribución y composición de los hábitats forestales a escala regional.

El pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) es la especie del género *Pinus* más ampliamente distribuida en el entorno circunmediterráneo. Es un elemento característico fundamental de los bosques del Mediterráneo occidental. La superficie de estos bosques de pinos en España supera los 2 millones de hectáreas. En la mayor parte de la superficie que ocupan, estos bosques son la única formación arbórea capaz de sobrevivir a las condiciones bioclimáticas presentes, por ello se han considerado altamente vulnerables al cambio climático. Su desaparición podría conducir a una reducción significativa de la cubierta arbórea en grandes áreas, avanzando hacia la desertificación, especialmente en las zonas de transición entre ombroclimas secos-subhúmedos y semiáridos. Todos estos hechos constatados hacen que la práctica de medidas de gestión forestal adaptativa en este hábitat tome el carácter de urgente. Sin embargo, existen una serie de carencias de conocimiento científico-técnico que dificultan su puesta en práctica de forma generalizada. El proyecto LIFE adapt-aleppo (LIFE20 CCA/ES/001809), ejecutado en el periodo 2021-2025, ha pretendido contribuir a superar estas carencias, principalmente en dos líneas de acción:

1. La ausencia diagnósticos de idoneidad del hábitat bajo los escenarios de cambio climático, así como de herramientas de seguimiento de procesos de decaimiento específicas para las masas forestales de *Pinus halepensis*.
2. La ausencia de modelos o directrices de gestión forestal adaptativa para las masas forestales ibéricas de *Pinus halepensis*.

Las Guías Técnicas para la Adaptación al Cambio Climático en pinares de *Pinus halepensis* en el Mediterráneo constituyen el principal resultado del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO a nivel de transferencia de resultados, pretendiendo sintetizar y transferir las aportaciones del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO en estas líneas de conocimiento. Se espera que a través de estas Guías pueda transformarse el carácter demostrativo de las actuaciones ejecutadas en el proyecto LIFE en aplicaciones reales replicadas a gran escala para mejorar la capacidad de adaptación, y por tanto la resiliencia de las masas forestales en el área mediterránea de la Península Ibérica. También, que los avances del proyecto, sintetizados en las Guías Técnicas, puedan ser integrados en las herramientas de planificación forestal y puedan ser así aplicadas en los procesos de toma de decisiones en materia de gestión forestal sostenible.



Así pues, el conjunto de Guías Técnicas elaboradas abarca:

- Las metodologías para el mapeo de la idoneidad del hábitat y el seguimiento de los procesos de decaimiento en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de la migración asistida de *Pinus halepensis* en trabajos de restauración forestal de su hábitat.
- El uso de la selvicultura de base ecohidrológica en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de medidas selvícolas para el fomento de la resiliencia y adaptabilidad de las masas a través de la diversificación estructural y florística en pinares de *Pinus halepensis*.
- El uso de medidas selvícolas para la gestión adaptativa de la regeneración post-incendio en pinares de *Pinus halepensis*.

El equipo técnico-científico que ha participado en la ejecución del proyecto LIFE y, en particular, en la redacción de las Guías Técnicas, es el conformado por:

- IDEN (Ingeniería del Entorno Natural), empresa con base en Castilla La-Mancha y la Región de Murcia, con amplia experiencia en consultoría de Ingeniería y Medio Ambiente.
- Agresta Sociedad Cooperativa, empresa de ámbito nacional, especializada en consultoría e innovación en torno a la gestión forestal y del medio natural.
- La Universitat de Lleida a través del Grupo de Investigación en Gestión Adaptativa y Dinámica Forestal (ADAPTAFOR).
- La Universidad Politécnica de Valencia a través del grupo de hidrología forestal Re-ForeST
- La Universidad de Castilla-La-Mancha a través del grupo de investigación de Ecología Forestal (ECOFOR) del Instituto botánico y ETSIAMB de Albacete.
- La Consejería de Medio Ambiente, Universidades, Investigación y Mar Menor (CARM) de la Región de Murcia.

1.2. OBJETIVOS

El principal objetivo del proyecto LIFE adapt-aleppo ha sido el desarrollo de nuevas herramientas para la adaptación de los bosques ibéricos de pino carrasco (subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I) al cambio climático, así como su aplicación demostrativa.

El logro del objetivo general del proyecto requería del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- 01** – Desarrollar un mapa de idoneidad del hábitat e implementar una herramienta para detectar los procesos de decaimiento mediante teledetección.
- 02** – Implementar y monitorear actuaciones de migración asistida dirigidas a mejorar la capacidad del ecosistema para adaptarse a la aridificación climática.
- 03** – Implementar y monitorear tratamientos selvícolas destinados a mejorar la vitalidad y reducir los efectos de la reducción de la disponibilidad de agua.
- 04** – Implementar y monitorear tratamientos selvícolas para mejorar la heterogeneidad estructural y florística y aumentar la diversidad de las respuestas a las perturbaciones.
- 05** – Implementar y monitorear técnicas de gestión adaptativa para mejorar la resiliencia y capacidad adaptativa de la regeneración post-incendio de pino carrasco.
- 06** – Desarrollar herramientas de gestión y transferirlas a la administración forestal, para promover la integración de la adaptación al cambio climático en las regulaciones nacionales y regionales de gestión forestal.
- 07** – Desarrollar tareas de monitoreo para evaluar el éxito e impacto del proyecto.
- 08** – Transferir las técnicas y herramientas implementadas a los principales actores locales y del área de distribución del pino carrasco europeo (baleares, franceses e italianos), con el fin de mejorar la gestión y la conservación a largo plazo del hábitat del pino carrasco en el sur de Europa.

El objetivo de esta Guía Técnica es recoger de forma sintética e integrada el modelo de gestión adaptativa mediante migración asistida de *Pinus halepensis* en trabajos de restauración forestal para su transferencia y replicabilidad, tanto para esta especie como para otras.

1.3. GLOSARIO Y CONCEPTOS CLAVE

ADAPTACIÓN

Ajustes en sistemas naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales.

AGUA AZUL

Es el agua que se exporta o sale del ecosistema bosque por escorrentía o drenaje profundo, llegando a los cursos de agua y/o acuíferos donde queda disponible para su consumo.

AGUA VERDE

Parte de la precipitación que es absorbida por la vegetación y que acabará volviendo a la atmósfera a través de la transpiración.

ARIDEZ

Estado que resulta de la deficiencia en agua, como consecuencia de la escasez de precipitaciones y de la intensidad de la evaporación por las elevadas temperaturas. Es la insuficiencia de agua en el suelo y en la atmósfera. Las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) define la aridez mediante la interrelación de la temperatura con las precipitaciones, basándose en el supuesto que con la temperatura aumenta correlativamente la evapotranspiración.

BANDA ESPECTRAL

Franja del espectro en la que opera el sensor del satélite para captar los niveles de energía emitidos por los objetos y ser traducida digitalmente en cada uno de los archivos que forman una imagen para representar visualmente la información.

DECAIMIENTO

Proceso por el que una comunidad de árboles, matorral u otras formaciones vegetales pierden vigor debido, principalmente, a la competencia intra y/o interespecífica o por la acción directa o difusa de agentes bióticos o abióticos nocivos.

ESTRÉS HÍDRICO

Concepto que designa la falta de agua en la vegetación, la cual se traduce en un descenso de actividad clorofílica de la planta y mayor nivel de riesgo de ataques por plagas, enfermedades o incendios.

IDONEIDAD DEL HÁBITAT

Concepto que designa el nicho fundamental de un hábitat, el cual está definido por una función $f(x, y)$ donde x y y son las variables ambientales que definen las condiciones donde el hábitat puede darse.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN

Un índice de vegetación es un valor único que se calcula transformando las observaciones de múltiples bandas espectrales. Se utiliza para realzar la presencia de elementos de vegetación verde y así ayudar a distinguirlos de los otros objetos presentes en la imagen. Dependiendo del método de transformación y de las bandas espectrales utilizadas, se podrían evaluar diferentes aspectos de la cobertura vegetal de la imagen, como el porcentaje de cobertura vegetal, la cantidad de clorofila, el índice de área foliar, etc.

LANDSAT

Misión espacial que recibe su nombre de la abreviatura LAND (tierra) y SAT (satélite) cuya constelación de satélites está gestionada por la NASA con el fin de monitorizar y llevar a cabo un seguimiento de la Tierra. Entre los productos más convencionales ofrecidos por los satélites de la misión se encuentran sus imágenes de libre descarga.

MIGRACIÓN ASISTIDA

Cambio de la composición específica o genética de una población, buscando sustituir (o complementar) a las especies o poblaciones mal adaptadas por especies o genotipos mejor adaptados a las condiciones climáticas previstas en el futuro.

MODELO CLIMÁTICO

Representación de los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan el sistema climático. Se utilizan para el estudio de la dinámica del sistema meteorológico y climático para las proyecciones del clima futuro.

NBR: Acrónimo del índice normalizado de incendios (Normalized Burn Ratio) destinado a identificar las zonas territoriales afectadas por un incendio y analizar la severidad generada por el mismo a través de las bandas de trabajo como el NIR y el SWIR.

REGIONES BIOCLIMÁTICAS

Zonas que presentan un clima predominante, con una vegetación y fauna adaptada a ella y con ecosistemas propios de dicha zona.

RESILIENCIA

Capacidad de un sistema ecológico para recuperar sus propiedades después de verse alterado por una perturbación o un estrés intenso y continuado.

SELVICULTURA ADAPTATIVA O SELVICULTURA PARA LA ADAPTACIÓN

La silvicultura para la adaptación frente al cambio climático se fundamenta en plantear aquellas prácticas que permitan reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa de las especies forestales frente al factor de estrés más limitante, que en el caso mediterráneo es el déficit hídrico.

SELVICULTURA ECOHIDROLÓGICA

Silvicultura que sitúa al agua en el centro de la planificación y cuantifica otras variables del ecosistema, como el crecimiento y vigor de los árboles/masa, las propiedades del suelo y los ciclos biogeoquímicos, la sensibilidad al clima de los árboles o la disminución del riesgo de incendios forestales.

SENTINEL

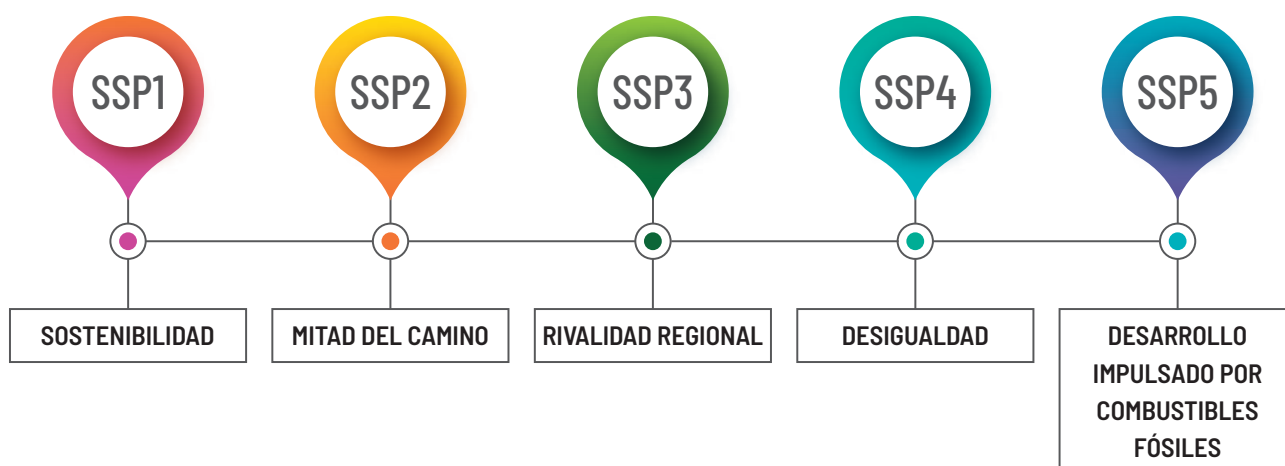
Flota de satélites de la Agencia Espacial Europea, que forman una constelación bajo diferentes misiones y cuyos satélites proveen de imágenes ópticas y datos radar que pueden ser descargadas gratuitamente y a máxima resolución.

SERIES TEMPORALES

Una serie temporal de imágenes de satélite está compuesta por una secuencia de imágenes (puntos de datos) de una misma ubicación, tomadas en intervalos regulares durante un periodo de tiempo determinado.

TRAYECTORIAS SOCIOECONÓMICAS COMPARTIDAS (SSP)

Son escenarios de cambios socioeconómicos globales proyectados hasta 2100. Se utilizan para derivar escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero según diferentes políticas climáticas, basados en narrativas que describen desarrollos socioeconómicos alternativos. Los escenarios son:



2. ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT 42.841 – PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

2.1. ECOLOGÍA DEL HÁBITAT

TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES ENTRE 12 Y 18 °C
PRECIPITACIONES ANUALES ENTRE 300 Y 600 mm


CLIMA MEDITERRÁNEO

Temperaturas

El hábitat se encuentra en regiones de clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves y lluviosos y veranos cálidos y secos. Las temperaturas medias anuales suelen oscilar entre los 12 y 18 °C.

Precipitación

El pino carrasco es muy resistente a la sequía, prosperando en áreas con precipitaciones anuales bajas, que pueden variar entre 300 y 600 mm. En algunos casos, puede sobrevivir en zonas con precipitaciones aún más bajas, gracias a su adaptabilidad.

NO ES EXIGENTE CON EL TIPO DE SUELO
SOporta SUELOS CON PH VARIADO, AUNQUE MUESTRA PREFERENCIA POR LOS LIGERAMENTE ALCALINOS

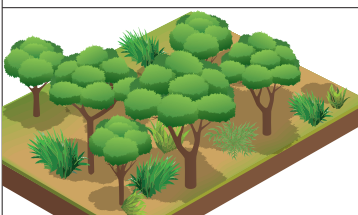

REQUERIMIENTOS EDÁFICOS

Tipos de suelo

El pino carrasco no es exigente en cuanto al tipo de suelo, colonizando suelos calizos, margosos, arenosos y arcillosos. Su capacidad para crecer en suelos pedregosos y pobres en nutrientes le permite establecerse en áreas marginales donde otras especies de árboles no prosperarían.

Adaptabilidad

Es capaz de soportar suelos con pH variado, aunque muestra preferencia por suelos ligeramente alcalinos. Su adaptabilidad a diferentes tipos de suelo le permite colonizar terrenos degradados y erosionados, contribuyendo a su recuperación.

SOTOBOSQUE: ESPECIES TÍPICAS DE LA GARRIGA Y EL MATORRAL MEDITERRÁNEO
HERBÁCEAS Y GRAMÍNEAS, MUCHAS DE ELLAS ADAPTADAS A CONDICIONES DE SEQUÍA ESTACIONAL Y SUELOS POBRES


VEGETACIÓN ASOCIADA

Estrato arbustivo

En el sotobosque se encuentran especies típicas de la garriga y el matorral mediterráneo, como el lentisco (*Pistacia lentiscus*), el enebro (*Juniperus oxycedrus*), el romero (*Rosmarinus officinalis*), la coscoja (*Quercus coccifera*), aladierno (*Rhamnus alaternus*), espinos (*Rhamnus lycioides*), etc.

Estrato herbáceo

Incluye una variedad de especies herbáceas y gramíneas, muchas de las cuales están adaptadas a condiciones de sequía estacional y suelos pobres. Algunas de estas especies pueden ser aromáticas o medicinales, contribuyendo a la biodiversidad del ecosistema.

ALBERGAN GRAN DIVERSIDAD DE ESPECIES DE MAMÍFEROS Y AVES
BIODIVERSIDAD DE INVERTEBRADOS ALTA


FAUNA ASOCIADA

Mamíferos

Los pinares de pino carrasco albergan una diversidad de mamíferos, como el jabalí (*Sus scrofa*), el zorro (*Vulpes vulpes*), y pequeños roedores como el lirón careto (*Eliomys quercinus*).

Aves

Hábitat crucial para muchas especies de aves, tanto residentes como migratorias. Entre ellas se encuentran el águila calzada (*Hieraaetus pennatus*), el búho real (*Bubo bubo*), y diversas especies de pequeños pájaros insectívoros y granívoros.

Invertebrados

La biodiversidad de invertebrados es alta, incluyendo numerosas especies de mariposas, escarabajos y hormigas, que desempeñan roles importantes en la polinización y el reciclaje de nutrientes.

2.2. DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT

El hábitat 42.841, conocido como Pinares ibéricos de pino carrasco, abarca una amplia área dentro de la región mediterránea de la Península Ibérica y las Islas Baleares. El pino carrasco (*Pinus halepensis*) es una especie adaptada a las condiciones climáticas y edáficas de esta región, y su distribución está influenciada por varios factores ambientales y humanos.

DISTRIBUCIÓN GENERAL

El pino carrasco está presente en una franja extensa que incluye tanto áreas costeras como interiores de la Península Ibérica. Su capacidad de adaptación le permite prosperar en una variedad de entornos, desde suelos pobres y pedregosos hasta tierras más fértiles.

ÁREAS COSTERAS

A lo largo de la costa mediterránea de la Península Ibérica, desde Cataluña hasta Andalucía oriental, el pino carrasco es una especie dominante. Las condiciones costeras, con suelos calizos y un clima mediterráneo característico, son ideales para el crecimiento de estos pinares. En estas zonas, el pino carrasco forma extensos bosques, a menudo intercalados con matorrales y otras especies mediterráneas.

ÁREAS MONTAÑOSAS Y PRELITORALES

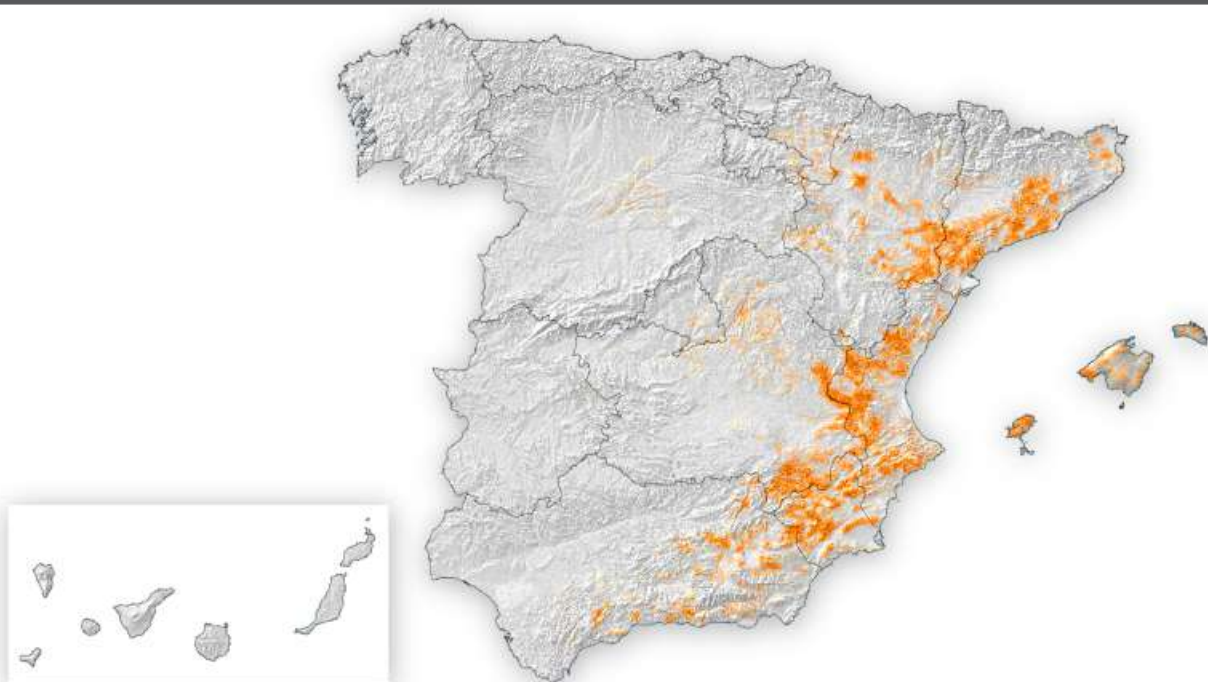
En las áreas montañosas y prelitorales, los pinares de pino carrasco también son comunes. Las sierras y montañas que bordean el Mediterráneo, como las sierras de Alicante, Murcia y Granada, proporcionan un hábitat adecuado para estos bosques. Aquí, el pino carrasco puede encontrarse en altitudes variables, adaptándose a las pendientes y suelos rocosos.

ÁREAS DEL INTERIOR

En el interior de la Península, especialmente en zonas con suelos calizos y clima semiárido, el pino carrasco sigue siendo una especie importante. Se pueden encontrar en la Meseta Central y en áreas como Aragón, donde las condiciones climáticas y edáficas aún permiten su crecimiento. En estas regiones, los pinares a menudo están asociados con otras formaciones vegetales mediterráneas, creando un mosaico de hábitats diversos.

El alcance geográfico del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO abarca el área potencial de distribución del bosque ibérico de pino carrasco (subtipo 42.841 del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats, Anexo I), incluyendo las vertientes mediterráneas de las montañas catalanas y del Sistema Ibérico, la cuenca del Ebro y las cordilleras prebéticas.

Pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis*)



3. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

El cambio climático está afectando de manera profunda y multifacética a los pinares ibéricos de pino carrasco. Durante las últimas décadas se ha registrado la ocurrencia de fuertes periodos de sequía (1998-2000, 2005-2006, 2014-2017, 2022-2024) que han afectado superficies forestales de cientos a miles de hectáreas, provocando elevadas tasas de mortalidad en el arbolado. La superficie de pinares de pino carrasco afectada por grandes incendios forestales en el decenio 2006-2015 superó las 70.000 ha, y en el periodo 2016-2019 sumó más de 12.000 nuevas hectáreas.

La ocurrencia de otros fenómenos meteorológicos extremos, como las lluvias torrenciales o las grandes nevadas (danas de enero de 2017, septiembre de 2019, o enero de 2020), sumados a fuertes vientos, han provocado daños severos en miles de hectáreas. Y del mismo modo, episodios severos de plagas forestales, en particular escolítidos (especialmente *Tomicus sp.*) y procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa*), han ocurrido generalmente tras los episodios más severos de sequía, causando también elevadas tasas de mortalidad en superficies importantes, o importantes pérdidas de vigor en el caso de la procesionaria.

A continuación, se describen los efectos específicos del cambio climático en estos ecosistemas, considerando distintos aspectos como la salud de los árboles, la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos:



1. AUMENTO DE LA TEMPERATURA

Estrés térmico

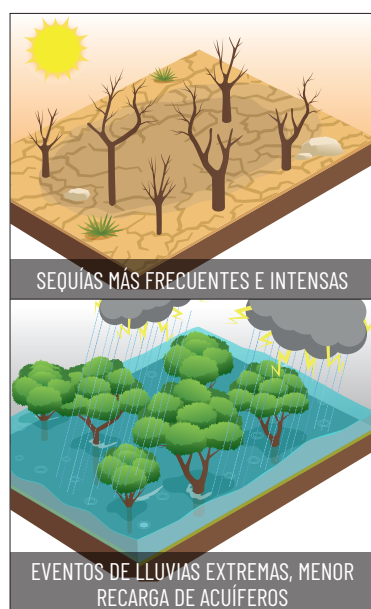
El aumento de la temperatura puede causar estrés térmico en los pinos carrascos, afectando su metabolismo y fotosíntesis. Esto puede reducir su crecimiento y vigor, haciendo a los árboles más susceptibles a otras amenazas como plagas y enfermedades.

Desplazamiento de zonas climáticas

Las zonas climáticas adecuadas para el pino carrasco podrían desplazarse altitudinal o latitudinalmente, forzando a las poblaciones de árboles a migrar hacia áreas más frescas si es posible, lo que podría llevar a una contracción de su área de distribución actual.

Alteración de las interacciones biológicas

Las especies asociadas, tanto plantas como animales, pueden responder de manera diferente al cambio de temperatura, lo que podría alterar las interacciones ecológicas y la estructura del ecosistema.



2. VARIABILIDAD EN LA PRECIPITACIÓN

Sequías más frecuentes e intensas

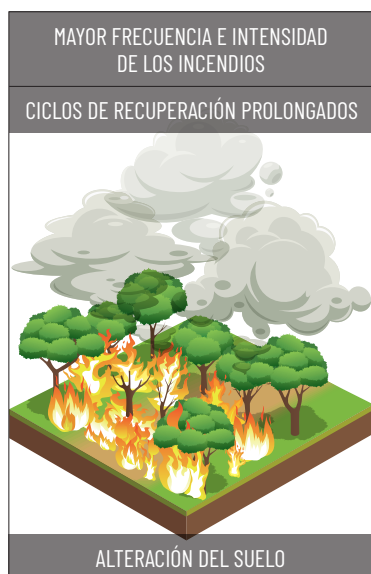
Las sequías prolongadas pueden reducir la disponibilidad de agua en el suelo, lo que afecta directamente la capacidad de los pinos carrascos para absorber el agua necesaria. Esto puede llevar a un aumento en la mortalidad de los árboles, especialmente de los más jóvenes y menos establecidos.

Eventos de lluvias extremas

Las precipitaciones más intensas pueden causar la erosión del suelo, lo que no solo afecta la estabilidad del terreno sino también la capacidad de las raíces para anclarse y absorber nutrientes. La pérdida de suelo fértil puede dificultar la regeneración natural de los bosques.

Disminución de la recarga de acuíferos

Menor frecuencia de lluvias moderadas y más eventos extremos pueden reducir la recarga de acuíferos, afectando la disponibilidad de agua subterránea que es crucial durante los periodos secos.



3. INCREMENTO DEL RIESGO Y LA SEVERIDAD DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Mayor frecuencia e intensidad

Las condiciones más secas y cálidas favorecen la ocurrencia de incendios forestales. Incendios más frecuentes e intensos pueden devastar grandes extensiones de pinares, causando pérdida de biomasa, biodiversidad y capacidad de captura de carbono.

Ciclos de recuperación prolongados

Después de incendios severos, los pinares pueden tardar mucho tiempo en regenerarse. Las áreas quemadas son más susceptibles a la erosión y la invasión de especies no nativas que pueden dificultar la recuperación.

Alteración del suelo

Los incendios pueden modificar la estructura y composición del suelo, afectando la capacidad de retención de agua y nutrientes, y alterando la microbiota del suelo esencial para la salud del bosque.



4. PROPAGACIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

Aumento de plagas

Las temperaturas más cálidas y las condiciones secas pueden favorecer la proliferación de plagas como la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), diferentes escolítidos (*Ips* sp., *Tomicus* sp. *Orthotomicus* sp.), el muérdago (*Viscum album*), o el nematodo de la madera del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*).

Enfermedades fúngicas

Las alteraciones en el clima pueden incrementar la incidencia de enfermedades fúngicas que afectan las raíces y la copa de los árboles. Las infecciones fúngicas pueden debilitar a los pinos, haciéndolos más vulnerables a otras amenazas.

Incremento de la mortalidad

El estrés combinado de sequías, altas temperaturas y plagas/enfermedades puede llevar a una mayor mortalidad de los pinos carrascos, afectando la estructura y dinámica del bosque.



5. PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

Reducción de hábitats

La contracción de los pinares debido a las condiciones climáticas adversas puede reducir los hábitats disponibles para muchas especies asociadas, desde aves hasta mamíferos y plantas subarborescentes y herbáceas.

Desajuste fenológico

Cambios en los ciclos estacionales pueden causar desajustes fenológicos, donde las especies que dependen de los pinos para alimentación o reproducción no coincidan temporalmente con los recursos necesarios, afectando las cadenas tróficas y la reproducción.

Fragmentación del hábitat

La pérdida y fragmentación de los pinares puede llevar a la fragmentación del hábitat, afectando la movilidad y viabilidad de poblaciones de fauna que dependen de estos bosques.

ALTERACIONES EN: REGULACIÓN DEL CLIMA, CICLO HIDROLÓGICO Y CALIDAD AIRE Y SUELO



6. ALTERACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Regulación del clima

La reducción en la cobertura forestal puede disminuir la capacidad de estos bosques para secuestrar carbono, exacerbando el cambio climático.

Ciclo hidrológico

La alteración de los patrones de precipitación y la pérdida de cobertura vegetal pueden afectar el ciclo hidrológico, reduciendo la infiltración de agua y aumentando la escorrentía superficial.

Calidad del aire y suelo

Los pinares contribuyen a la purificación del aire y la mejora de la calidad del suelo. La disminución de estos bosques puede deteriorar estos servicios, afectando la salud humana y la calidad ambiental.

En resumen, el cambio climático representa un desafío significativo para los pinares ibéricos de pino carrasco. Sin embargo, mediante la implementación de estrategias de gestión sostenible, restauración ecológica, protección contra incendios, monitoreo constante y una mayor investigación, es posible mitigar algunos de estos efectos y aumentar la resiliencia de estos ecosistemas vitales.

4. LA GESTIÓN FORESTAL COMO MEDIDA DE ADAPTACIÓN DE LOS BOSQUES AL CAMBIO CLIMÁTICO

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO está enfocado en mejorar la adaptación de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis*) al cambio climático mediante la implementación de prácticas de gestión forestal adaptativa. Este enfoque, que puede ser extendido a otras especies y ecosistemas forestales, se basa en cinco estrategias clave: el monitoreo continuo, la migración asistida, la silvicultura de base ecohidrológica, la diversificación florística y estructural y la gestión de la regeneración post-incendio.

1. MONITOREO CONTINUO

- El estudio y seguimiento de la idoneidad de un determinado emplazamiento en base a sus condiciones ambientales actuales y futuras para albergar el hábitat de los pinares ibéricos de *Pinus halepensis*, proporciona una información de gran valor para la planificación de acciones de gestión forestal adaptativa.
- El monitoreo continuo de la salud de los pinares mediante la detección y el seguimiento de los procesos de decaimiento o pérdida de vigor, permite a los gestores forestales emprender acciones de gestión forestal de carácter preventivo o mitigador de los efectos de dichos eventos.

2. MIGRACIÓN ASISTIDA

- La migración asistida implica la reubicación de especies forestales a áreas donde las condiciones climáticas serán más favorables en el futuro. Esta técnica es crucial para asegurar la supervivencia de especies que no pueden desplazarse naturalmente a la velocidad necesaria para adaptarse a las condiciones cambiantes.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han seleccionado ejemplares de pino carrasco de distintas regiones de procedencia, adaptados a condiciones más secas y se han plantado en áreas preseleccionadas que serán más adecuadas en el futuro. Esto ayudará a crear poblaciones más resilientes y asegura la supervivencia a largo plazo de la especie.

3. SILVICULTURA DE BASE ECOHIDROLÓGICA

- Este enfoque se centra en gestionar los bosques para mejorar los procesos hidrológicos, promoviendo una mayor infiltración de agua, reduciendo la escorrentía y conservando el suelo.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han implementado de prácticas como la reducción moderada del número de árboles, lo que aumenta la cantidad de agua disponible en el sistema y mejora su estado hídrico. Incluso en áreas donde las precipitaciones son más elevadas, favorece la recarga de acuíferos. Este aumento del estado hídrico del ecosistema impacta en otros factores como el aumento del crecimiento y el vigor de los árboles y los rodales, mejora las propiedades del suelo y los ciclos biogeoquímicos, disminuye la sensibilidad a sequía, incrementa la resiliencia de los árboles al clima y reduce el riesgo de incendios forestales por una mayor hidratación del sistema.

4. DIVERSIFICACIÓN FLORÍSTICA Y ESTRUCTURAL

- Aumentar la diversidad de especies y la estructura del bosque es una estrategia clave para mejorar la resiliencia del ecosistema frente a las perturbaciones climáticas.

- El LIFE ADAPT-ALEPPO pretende integrar en la gestión de los pinares de pino carrasco la máxima de que cualquier tratamiento selvícola de los tradicionalmente aplicados vaya dirigido a provocar un incremento sustancial en la diversidad estructural y/o composicional, tanto a nivel de rodal como a escala de monte o paisaje. Para ello, se han seleccionado una variedad de especies autóctonas que se han integrado junto con el pino carrasco, promoviendo una estructura forestal diversa que incluya diferentes edades y tamaños de árboles. Esto crea un ecosistema más equilibrado y resistente a plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos.

5. REGENERACIÓN POST-INCENDIO

- Los incendios forestales son una amenaza creciente debido al cambio climático, y la gestión de la regeneración post-incendio es vital para restaurar los bosques afectados.
- En LIFE ADAPT-ALEPPO se han realizado un conjunto de actuaciones selvícolas innovadoras y demostrativas en bosques de pino carrasco de alta densidad afectados por grandes incendios forestales, para mejorar la resiliencia de la regeneración frente a nuevas perturbaciones, como su capacidad adaptativa frente a un escenario de aridificación climática. Para ello, se ha reducido la competencia intraespecífica en interespecífica, favoreciendo la diversificación de las masas desde estadios tempranos de desarrollo.

Estas prácticas no solo mejoran la resiliencia de los bosques, sino que también proporcionan beneficios adicionales como la conservación de la biodiversidad, la mejora de los servicios ecosistémicos y la protección del suelo y del agua. El enfoque integral del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO puede servir como modelo para otras iniciativas de gestión forestal adaptativa frente al cambio climático.

5. IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MIGRACIÓN ASISTIDA EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DEL HÁBITAT DEL PINO CARRASCO

5.1. BASES CIENTÍFICO-TÉCNICAS

El *Pinus halepensis*, es una especie valorada por su resistencia y su capacidad para adaptarse a entornos difíciles. Sin embargo, el cambio climático y otras amenazas ambientales han puesto en riesgo su hábitat, lo que ha llevado a los científicos a explorar técnicas innovadoras para su conservación, entre ellas, la migración asistida.

Según el Inventario Forestal Nacional la superficie forestal en España ha crecido en las últimas décadas (un 30% entre 1990 y 2010), y la superficie ocupada por los pinares ibéricos de pino carrasco no es una excepción a esta tendencia general. Sin embargo, la desertificación también avanza, afectando fundamentalmente a las regiones de clima semiárido, y específicamente a la formación forestal dominada por el pino carrasco en estas condiciones bioclimáticas. Debido, por una parte, a la aridificación del clima, y por otra a los efectos de las perturbaciones antrópicas (ej. sobrepastoreo histórico) o naturales (ej. incendios forestales recurrentes), algunas superficies se encuentran o transitan hacia un estado de degradación tal que presentan enormes dificultades para evolucionar naturalmente hacia la formación arbolada. El estado actual de estas zonas puede variar desde suelos prácticamente desnudos y de elevada erosionabilidad, hasta matorrales mediterráneos en las etapas seriales menos evolucionadas del pinar.

La restauración forestal persigue la recuperación de terrenos forestales que han sufrido algún proceso de degradación, mejorando su calidad ambiental, restableciendo sus funcionalidades y favoreciendo su evolución dinámica hacia etapas más estables y maduras ecológicamente.

La aridificación de las condiciones climáticas esperada en la región Mediterránea tendrá como consecuencia que las condiciones a las que las formaciones arboladas están localmente adaptadas cambien drásticamente en pocas décadas. En este contexto, la restauración debe enfocarse desde la perspectiva de la migración asistida (MCKAY ET AL., 2005; PROBER ET AL., 2015; WILLIAMS AND DUMROESE, 2013).

La migración asistida implica la reubicación de especies forestales, o poblaciones dentro de especies, a áreas donde se espera que las condiciones climáticas serán más favorables para ellas en el futuro (DALRYMPLE et al. 2021). Aunque esta técnica puede contribuir a mejorar la supervivencia de especies que no pueden desplazarse naturalmente a la velocidad necesaria para adaptarse a las condiciones cambiantes, aún falta mucho conocimiento sobre sus condiciones de aplicación.

Por ello, con el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/01809) se establece un conjunto de rodales demostrativos en los que se han implementado actuaciones de restauración forestal bajo un criterio de migración asistida, en pinares altamente degradados dentro del área de idoneidad potencial para el subtipo 42.841 (pinares ibéricos de pino carrasco) del Hábitat 9540 de la Directiva Hábitats (Anexo I).

La migración asistida se ha aplicado hasta el momento de forma experimental en el contexto del bosque Mediterráneo, pero la aceleración del cambio climático en la región hace cada vez más urgente su implementación práctica como una medida fundamental de Gestión Forestal Adaptativa.

Así, la migración asistida es una técnica prometedora para la conservación y restauración del hábitat del *Pinus halepensis* en el contexto del cambio climático. Sin embargo, su éxito depende de una planificación cuidadosa, la selección adecuada de sitios de destino y el manejo adaptativo. La colaboración entre técnicos, científicos, gestores de los montes y administraciones es esencial para asegurar que esta técnica se implemente de manera efectiva y sostenible, garantizando la preservación de esta emblemática especie mediterránea.

5.2. SISTEMAS FORESTALES OBJETO DE APLICACIÓN Y RECOMENDACIONES GENERALES

En LIFE ADAPT-ALEPPO se han seleccionado ejemplares de pino carrasco de distintas regiones de procedencia, algunas de ellas adaptadas a condiciones más secas y cálidas, y se han plantado en áreas preseleccionadas que serán más adecuadas en el futuro. Esto ayudará a mejorar el conocimiento sobre la respuesta de diferentes poblaciones a las condiciones climáticas esperadas, contribuyendo a crear poblaciones más resilientes a largo plazo.

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

SISTEMAS FORESTALES DE PINO CARRASCO DEGRADADOS.

Se trata de casos de masas forestales desarboladas y con ausencia de otra vegetación de interés, encontrando casos con presencia de afloramientos rocosos y otros con escasa pedregosidad. En función de este último aspecto, el protocolo de plantación será distinto.

Algunos casos ante los cuales nos encontramos, son:

- Antiguos terrenos agrícolas con apenas presencia de pinos, tomillo y algún enebro o pies no inventariables
- Sistemas forestales quemados de *Pinus halepensis*.: masas forestales quemadas con ausencia de regenerado natural de arbolado y matorral de interés.

En estos casos se llevarán a cabo plantaciones continuas, en toda la superficie.

SISTEMAS FORESTALES DE PINO CARRASCO ENVEJECIDAS SIN PRESENCIA DE REGENERADO, Y CON OQUEDADES.

Se trata de masas envejecidas de *Pinus halepensis*, de origen natural en muchos casos y también procedentes de repoblaciones.

El pinar natural consiste en un monte irregular por bosquetes o golpes de arbolado, muy desestructurado, en el que ocasionalmente aparecen fustales bajos y latizales altos con corros de regeneración. Otras zonas presentan un estado de desarrollo muy deficiente, en gran medida debido a las condiciones climáticas extremas, de ausencia prolongada de precipitaciones, y edafológicas en las que se desarrolla el arbolado.

En este caso se llevarán a cabo plantaciones en oquedades dispersas localizadas en el interior de la masa.



5.3. EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL HÁBITAT ACTUAL Y FUTURA

5.3.1. DISEÑO DE LAS ACTUACIONES

Inicialmente se establece un protocolo de trabajo el cual consiste en:

- Definición de las procedencias de *Pinus halepensis* a utilizar en las plantaciones, mediante un análisis de idoneidad previo. La selección de las procedencias de *P. halepensis* se ha realizado en base a lo presentado por Pemán-García et al., 2012, donde se encuentra representada la distribución de *P. halepensis* junto con las regiones de procedencia de sus materiales reproductivos. Así, para cada área de plantación se han escogido 2 procedencias locales, 2 de escenario moderado y 2 de escenario severo, por lo que se cuenta con un total de 6 tipos de procedencias por rodal. Esto se hace, por un lado, para aumentar la diversidad de procedencias, y por otro, para asegurar cualquiera de los tres tipos si se dieran problemas en la disponibilidad de algunas procedencias.

- **Procedencia local:** tal y como su nombre indica, será la procedencia típica de la zona donde se establezca el rodal;
- **Procedencia de escenario moderado:** procederá de áreas con un clima muy contrastado tanto en lo árido como en lo continental, por lo que pueden adaptarse a un rango climático más amplio;
- **Procedencia de escenario severo:** serán procedencias que habitan en áreas donde la aridez es el rasgo dominante del hábitat y se espera una mayor adaptación a condiciones climáticas específicas como la intensidad y duración de la sequía.

Procedencia local

Típica de la zona donde se establezca el rodal

Escenario moderado

De áreas con un clima muy contrastado (árido-continental) - Adaptación a rango climático más amplio

Escenario severo

De áreas donde la aridez es el rasgo dominante del hábitat y se espera una mayor adaptación al CC

FIGURA 1. Tipología de procedencias de *Pinus halepensis*

Las procedencias empleadas en cada Región de actuación han sido las siguientes:

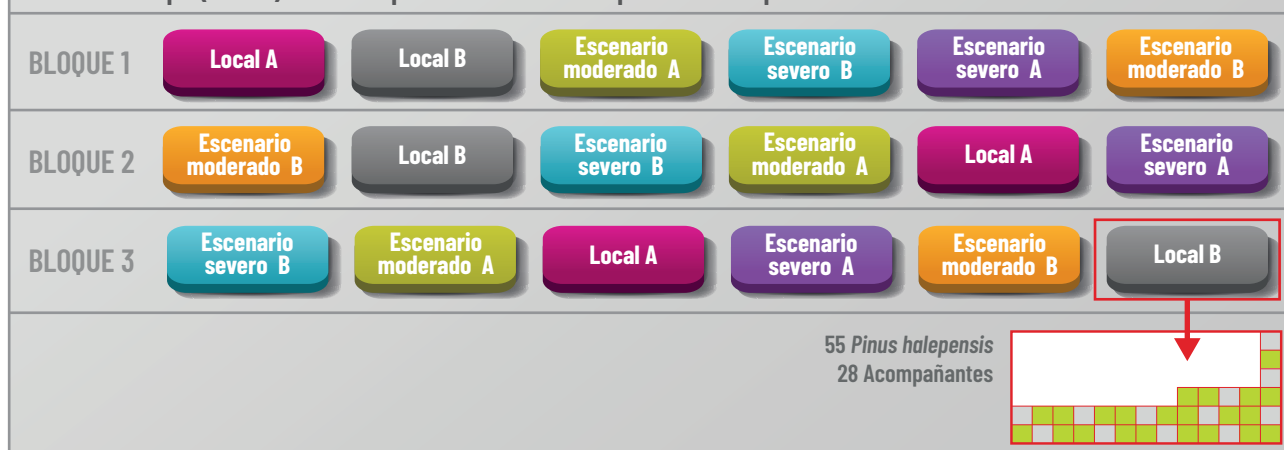
Características bioclimáticas	Región		Local	Cambio climático moderado	Cambio climático severo
Mediterráneo árido y sub-árido	Murcia	A	Sudeste (13)	Litoral Levantino (11)	Sur (17)
		B	Bética Septentrional Sur (14C)	Levante Interior (10)	Bética Meridional (15)
Mediterráneo costero	Valencia	A	Litoral Levantino (11)	Bética Meridional (15)	Sudeste (13)
		B	Levante Interior (10)	Bética Septentrional (14)	Sur (17)
			H.S. Alacuás		
	Castellón	A	Maestrazgo-Los Serranos (9)	La Mancha (8)	Sudeste (13)
		B	Levante Interior (10)	Bética Septentrional (14)	Bética Meridional (15)
Mediterráneo continentalizado de veranos cálidos	Barcelona	A	Cataluña interior (3)	Bárdenas-Ribagorza (4)	Monegros-Depresión del Ebro (6)
		B	Cataluña litoral (2)	Levante Interior (10)	Bética Meridional (15)
	Zaragoza	A	Ibérico Aragonés (5)	La Mancha (8)	Sudeste (13)
		B	Depresión del Ebro (6)	Levante Interior (10)	Bética Meridional (15)

TABLA 1. Procedencias seleccionadas para plantaciones de migración asistida del LIFE ADAPT-ALEPPO

- Por otro lado, las especies leñosas acompañantes se escogen en base al cortejo florístico de cada bosque de *P. halepensis*, en función de las características bioclimáticas (Gómez-Manzaneque et al., 1997).
- Se establece una cantidad de planta de: 1.500 plantas por rodal de entre 1 y 2 ha, incluyendo 1.000 ejemplares de *Pinus halepensis* y 500 de especies acompañantes.
- Cada rodal será dividido en 3 bloques de iguales dimensiones que a su vez se dividirán en 6 secciones cada uno. En cada sección se plantará una procedencia de pino carrasco, por lo que cada bloque tendrá los 6 tipos de procedencia. La posición que ocupe cada procedencia dentro de cada bloque estará aleatorizada. Esta división hace que cada sección contenga 66% de *P. halepensis* y 34% de las especies acompañantes, esto significa que aproximadamente cada 2 plantones de *P. halepensis* se establecerá uno de especie acompañante.

Diseño de plantación

Total rodal tipo (1-2 ha): 1.000 de pino carrasco + 500 pies de acompañantes



- Partiendo del protocolo citado anteriormente, los trabajos se han ido ajustando a las necesidades de cada uno de los rodales de actuación, al encontrar restricciones, especialmente, fisiográficas. Así se dan los siguientes casos, aplicando para cada uno de ellos, una técnica distinta de plantación:

TIPO 1

Rodal ubicado dentro de área de *Pinus halepensis*, con casi inexistencia de vegetación, con escasa pedregosidad y baja pendiente.

Rodal dividido en parcelas de igual tamaño para plantación de una procedencia por parcela.

Plantación de 1.000 ejemplares de pino carrasco de 6 procedencias distintas y 500 ejemplares de especies acompañantes de matorral autóctono.

TIPO 2

Rodal ubicado dentro de masas de avanzada edad de *Pinus halepensis* con regeneración natural muy deficitaria.

Plantación aleatoria de procedencias, en oquedades.

Plantación de 700-1.000 ejemplares de pino carrasco de 6 procedencias distintas y 150-200 ejemplares de especies acompañantes.

TIPO 3

Rodal ubicado dentro de masas de *Pinus halepensis*, con casi inexistencia de vegetación, y presencia de afloramientos rocosos.

Plantación por hileras con alternancia de procedencia cada 10 plantas

Plantación de 1.200-1.500 (700 pies/ha) ejemplares de pino carrasco de 7 procedencias distintas y 400 ejemplares de especies acompañantes (200 pies/ha)

TIPO 4

Rodal ubicado dentro de masa quemada de *Pinus halepensis*, con variabilidad de exposición.

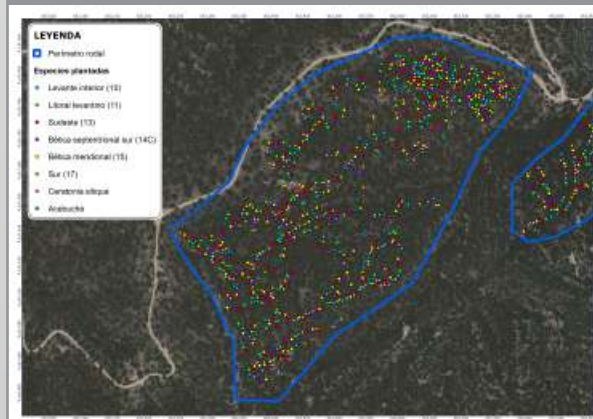
Plantación por bloques completos al azar, incluyendo todas las procedencias en cada bloque

Plantación de 800 pies/ha: 75% de pino carrasco de 6 procedencias distintas y 25% de especies acompañantes

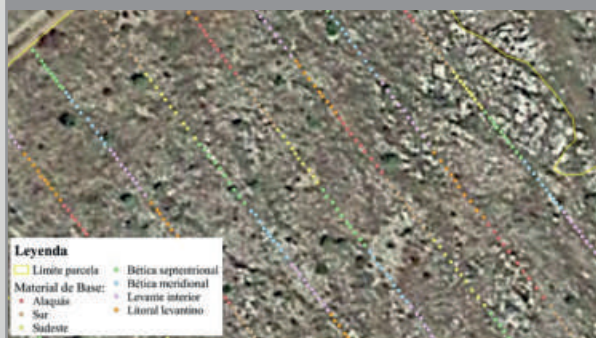
EJEMPLO DE PLANTACIÓN DEL TIPO 1



EJEMPLO DE PLANTACIÓN DEL TIPO 2



EJEMPLO DE PLANTACIÓN DEL TIPO 3



EJEMPLO DE PLANTACIÓN DEL TIPO 4



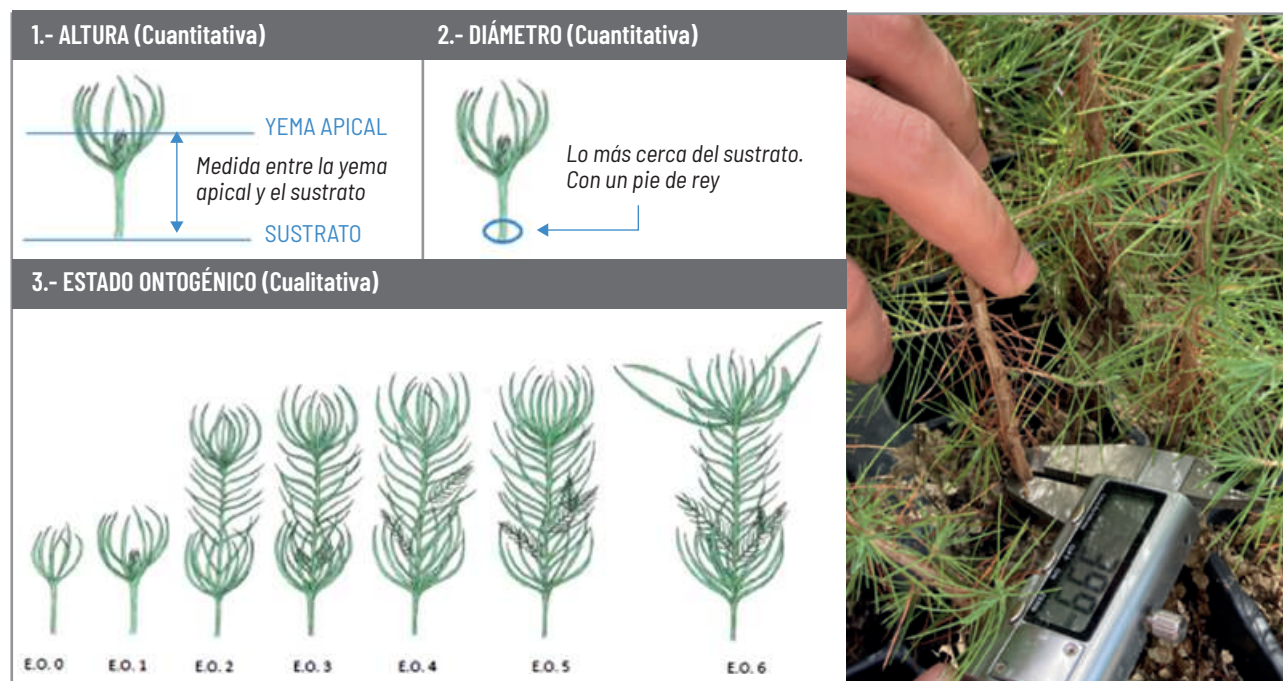
- Con el proyecto LIFE ADPT-ALEPPO Se han desarrollado trabajos de migración asistida en un total de 59,80 ha repartidas en 12 rodales, tal y como se indica en la siguiente tabla:

NOMBRE RODAL	MONTE	MUNICIPIO	PROVINCIA	DISEÑO ACTUACIÓN	SUPERFICIE
C2 Sádaba	MUP Z0216 Bárdena Baja	Sádaba	Zaragoza	Tipo 1	2,01
C2 Zuera	MUP Z0262 Las Fajas	Zuera	Zaragoza	Tipo 1	2,00
C2 Sant Martí de Tous	Propiedad Jordi Balsells Pintó	Bellprat	Barcelona	Tipo 4	6,19
C2 Teresa	CS3045 Almagra y Cerro Gordo	Teresa	Castellón	Tipo 1	2,33
C2 Andilla	V109 Peña Parda	Andilla	Valencia	Tipo 3	2,56
C2 Cortes	V170/V1081 Baronía de Otonel	Cortes de Pallás	Valencia	Tipo 3	2,03
C2 Pedralba	V089 La Serratilla	Pedralba	Valencia	Tipo 3	1,95
C2 Cabeza Asno	CUP 48 Umbría y Solana Cabeza del Asno	Cieza	Murcia	Tipo 1	2,23
C2 Cabezo Ciervos	CUP 51 Cabezo de los Ciervos	Fortuna	Murcia	Tipo 1	1,08
C2 Calderones Pila	CUP 40 Sierra de La Pila	Abarán	Murcia	Tipo 2	17,92
C2 Enmedio Pila	CUP 40 Sierra de La Pila	Abarán	Murcia	Tipo 2	16,91
C2 Serrata Puerto	CUP 4 Sierra y Serrata del Puerto	Calasparra	Murcia	Tipo 1	2,10
TOTAL					59,80

5.3.2. PROTOCOLO DE SEGUIMIENTO

a) Seguimiento de plantas en vivero

Para el control y seguimiento de la calidad de planta es necesario hacer un seguimiento en vivero del desarrollo de la misma, con el fin de ayudar a comprender posteriormente los datos de supervivencia o desarrollo de la planta cuando se realiza la plantación. Así, se procede a medir los siguientes parámetros, de aproximadamente el 10% de las plantas: altura, diámetro, estado ontogénico.



b) Trabajos previos a la puesta en obra

Previo al trabajo de campo se lleva a cabo el etiquetado de cada uno de los ejemplares de pino carrasco a plantar (preferentemente de 1 color de etiqueta por procedencia) y la numeración de cada una de ellas. Además, se precisa de la caracterización previa de rodales, el diseño de plantación y replanteo previo de sectores de plantación.



c) Trabajos de puesta en obra

La plantación se realiza con personal especializado, con la formación necesaria para la correcta distribución de plantas, así como la medición con GPS de la ubicación de cada una de las plantas, para tenerlas perfectamente identificadas a la hora de hacer su seguimiento.



d) Seguimiento de plantas en campo

El seguimiento de las plantaciones se lleva a cabo mediante el análisis de supervivencia de cada uno de los ejemplares plantados, tomando nota además de los parámetros de: altura, diámetro y estado ontogénico de las plantas vivas. La periodicidad de las mediciones para su seguimiento durante los años posteriores a la plantación es anual, realizando una medición pre-verano y otra post-verano.

5.3.3. RESULTADOS

Cabe reconocer la migración asistida como una pieza fundamental del puzzle de la adaptación de las formaciones de *Pinus halepensis*. Los resultados del LIFE e investigaciones previas demuestran que existe posibilidad de contribuir a la adaptación a través del material genético usado.

Tras los primeros análisis del seguimiento de los rodales plantados en el seno del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO, se observa que la procedencia "Levante interior" ha sido la que mejor ha funcionado, en cuanto a supervivencia, en la mayor parte de las parcelas de Murcia, Valencia y Barcelona, adaptándose bien tanto a zonas más frías como a las más secas.

En el caso de las parcelas localizadas en Valencia y Barcelona, se comprueba que las plantas procedentes de mejora genética (procedencia "Alacuás", del huerto semillero clonal de *Pinus halepensis* formado por familias procedentes de las regiones de procedencia 9 Maestrazgo-Los Serranos, 10 Levante Interior y 11 Litoral Levantino), también responden mejor que el resto de procedencias, presentando, además, mayores crecimientos. Resultados a largo plazo de otras plantaciones desarrolladas en Valencia corroboran este resultado (Blanco-Cano et al., en revisión).

Podemos concluir que la procedencia local ha tenido el mejor rendimiento en supervivencia o crecimiento solamente en 3 de las 9 parcelas de estudio, coincidiendo con la procedencia Levante interior (procedencia local de las parcelas ubicadas en Valencia). Esto sugiere, que usar este criterio de repoblación tiene una menor fiabilidad, tal y como se puede observar en la figura 15, con resumen de resultados de supervivencia a corto plazo en las plantaciones de migración asistida ejecutadas en Murcia y Cataluña.

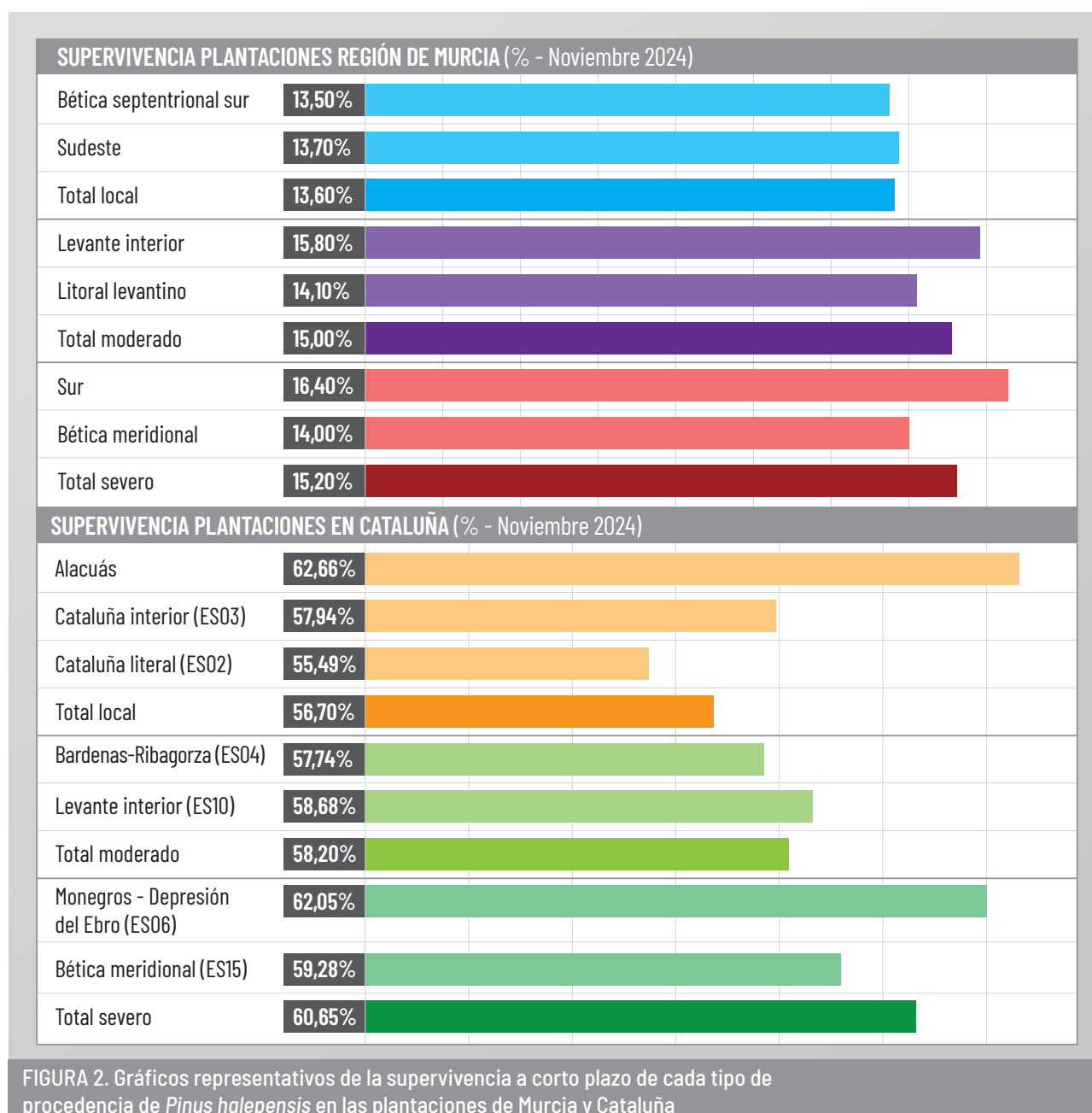


FIGURA 2. Gráficos representativos de la supervivencia a corto plazo de cada tipo de procedencia de *Pinus halepensis* en las plantaciones de Murcia y Cataluña

5.3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis de costes de los trabajos de migración asistida se han tenido en cuenta distintas tarifas de precios, rendimientos de las obras desarrolladas en el LIFE ADAP-ALEPPO, proyectos de la misma tipología, precios de mercado actuales, etc.

Para el caso de los trabajos de plantaciones de migración asistida, se ha de tener en cuenta varios aspectos importantes, en relación con los costes:

- Disponibilidad de planta de diferentes procedencias, tras el cultivo en vivero forestal de la Administración Pública o privado. La semilla de diferentes procedencias se puede solicitar al Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales "El Serranillo", localizado en Guadalajara.
- Etiquetado de las distintas procedencias, si se desea llevar un seguimiento de las plantaciones para analizar las procedencias que mejor funcionan.
- Los costes de ejecución de plantaciones de migración asistida por hectárea de superficie, variará en función de la densidad de plantación y de las actuaciones a desarrollar:
 - Preparación de terreno
 - Aporte de materia orgánica y/o abono
 - Ahoyado
 - Adquisición de las plantas
 - Transporte a campo y distribución de las plantas
 - Plantación con construcción de alcorque
 - Riegos (establecimiento, socorro, etc.)
 - Binas y aporcados
 - Protecciones ante presencia de roedores (malla proyectora y otros).

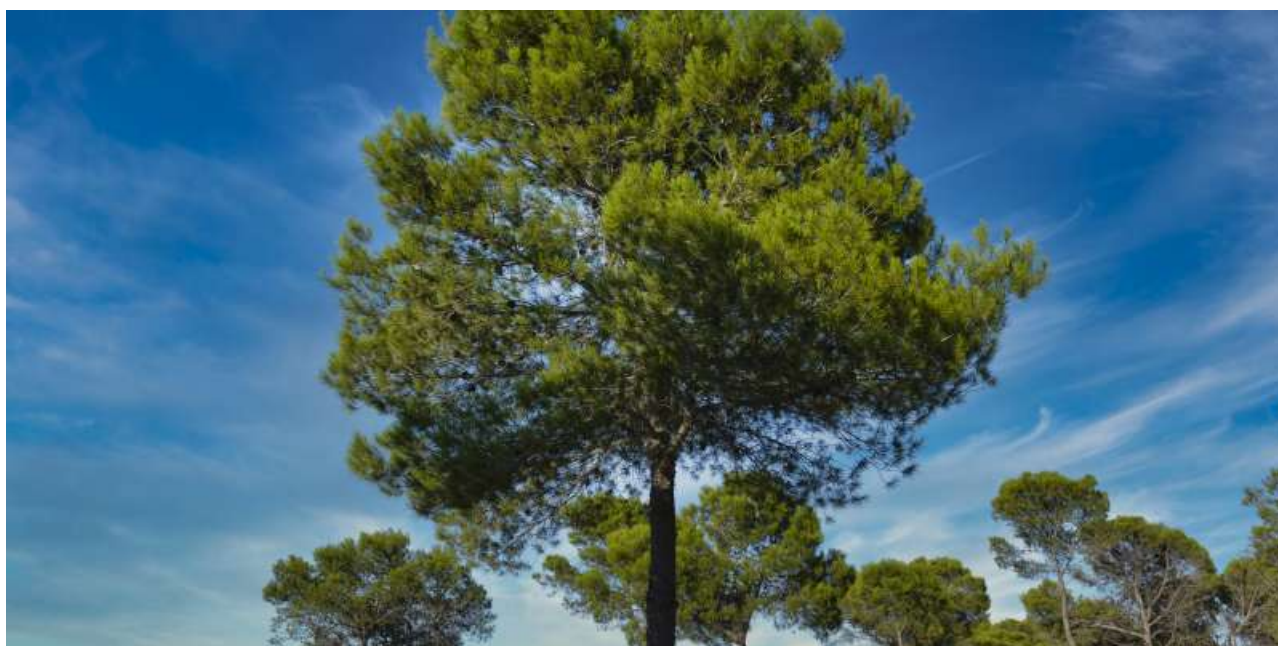
Así, el coste medio por hectárea de superficie, en plantaciones de <700 pies/ha y teniendo en cuenta un riego de establecimiento, y sin protecciones, puede alcanzar los 7.000 €/ha (incluido el coste de la planta).

Si las plantaciones alcanzan los 1.500 pies/ha, el coste podría rondar los 12.000 €/ha, para las mismas condiciones anteriores.

En el caso de plantar en oquedades dentro de una masa, se tendrá en cuenta que el coste aumentará respecto a los casos anteriores, debido a que se precisará un tiempo extra para el traslado a los distintos puntos de actuación, así como resultar más compleja la distribución de planta o la ejecución de los riegos.

Para más detalle, se puede consultar la herramienta o catálogos de costes de implementación de medidas de adaptación desarrollada en el seno del Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO y disponible en el siguiente enlace:

<https://adaptaleppo.eu/tablas-acciones/>



5.4. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Los resultados obtenidos destacan la importancia del material genético en la adaptación de *Pinus halepensis* a las condiciones climáticas cambiantes. La mejor adaptación de las procedencias genéticas no locales, especialmente las procedentes del huerto semillero clonal de Alacuás, subraya la necesidad de reevaluar el uso de procedencias locales en programas de reforestación (VOLTAS et al. 2023). Nuestros hallazgos sugieren que el cambio climático está alterando las condiciones ambientales, desfasando las adaptaciones locales históricas (AMEZTEGUI et al. 2025).

Es muy posible que los resultados obtenidos se expliquen por un cambio de clima, y manifiesten que las procedencias locales presentan unas exigencias climáticas diferentes a las que ofrece el clima actual. Esto plantea desafíos éticos y logísticos para la gestión forestal, especialmente en términos de balancear la conservación de la diversidad genética local con la necesidad de garantizar la supervivencia y funcionalidad del ecosistema. No obstante, es necesario continuar con el monitoreo de las plantaciones efectuadas para poder extraer conclusiones a medio plazo, así como para analizar qué rasgo o rasgos son los que confieren a cada procedencia su capacidad de adaptación al clima (HEVIA et al. 2020) y qué combinaciones de procedencias pueden fomentar el éxito de las restauraciones forestales con pino carrasco (NOTIVOL et al. 2020).

Se considera preciso investigar en la búsqueda de los genotipos que produzcan la enzima 5-metiltetrahidropteróiltriglutamato-homocisteína metiltransferasa (EC 2.1.1.14), indicador de la adaptación de *Pinus halepensis* a la sequía (DEL CAMPO, A.D., 2022; TAÏBI, K., 2015; TAÏBÍ, K., 2017). En ellos se demuestra el papel clave de la metionina para la tolerancia a la sequía en *Pinus halepensis*.

Se considera de interés desterrar la idea del uso de la "Región de procedencia local" en los proyectos de adaptación, pues se observa que no es la que presenta mejores datos de supervivencia y alturas de pies.

Para reducir el riesgo, se recomienda utilizar una colección de diferentes procedencias o de material genético capaz de amortiguar las diferentes manifestaciones climáticas.

Trabajar en el manejo genético de *Pinus halepensis* para contribuir a la adaptación debe constituir un objetivo de primer orden para la política forestal. La adaptación de las formaciones de *Pinus halepensis* para la generación de servicios básicos como la protección de la vida es un objetivo de primer orden en el área mediterránea.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMEZTEGUI, A., VOLTAS, J., TORNÉ, G., BLANCO-CANO, L., DEL CAMPO, A., MARTÍN-ALCÓN, S., VICENTE-VALERO, L., JORDÁN, E. (en revisión). Metodología cuantitativa para la elección de procedencias de *Pinus halepensis* en actividades de reforestación bajo cambio climático. 9 Congreso Forestal Español

DALRYMPLE, S.E., WINDER, R., CAMPBELL, E.M., 2021. Exploring the potential for plant translocations to adapt to a warming world. *J Ecol* 109, 2264–2270. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13715>

DEL CAMPO, A.D., OTSUKI, K., SERENGIL, Y., BLANCO, J.A., YOUSEFPOUR, R., WEI, X., 2022. A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *For. Ecol. Manag.* 519, 120324. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120324>

MCKAY, J.K., CHRISTIAN, C.E., HARRISON, S., RICE, K.J., 2005. "How Local Is Local?"—A Review of Practical and Conceptual Issues in the Genetics of Restoration. *Restor. Ecol.* 13, 432–440. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00058.x>

Taïbi, K., Del Campo, A. D., Aguado, A., & Mulet, J. M. (2015). The effect of genotype by environment interaction, phenotypic plasticity and adaptation on *Pinus halepensis* reforestation establishment under expected climate drifts. *Ecological Engineering*, 84, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.005>

Taïbi, K., Del Campo, A. D., Vilagrosa, A., Bellés, J. M., López-Gresa, M. P., Pla, D., Calvete, J. J., López-Nicolás, J. M., & Mulet, J. M. (2017). Drought Tolerance in *Pinus halepensis* Seed Sources As Identified by Distinctive Physiological and Molecular Markers. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1202. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01202>

VOLTAS, J., 2023. Tres siglos de Genética Forestal: situación actual, retos e incertidumbres. *Cuad. Soc. Española Cienc. For.* 49, 101–116



LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20 CCA/ES/001809)

"ADAPTIVE MANAGEMENT OF MEDITERRANEAN PINUS HALEPENSIS FORESTS IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE"

GUÍA TÉCNICA



IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE MIGRACIÓN ASISTIDA EN LA RESTAURACIÓN FORESTAL DEL HÁBITAT DEL PINO CARRASCO



Universitat
de Lleida



Universidad de
Castilla-La Mancha



UNIVERSITAT
POLITÉCNICA
DE VALÈNCIA