



LIFE ADAPT-ALEPPO [LIFE20 CCA/ES/001809]



TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN Y TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LOS PINARES IBÉRICOS DE 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:

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

REDACCIÓN:

Santiago Martín Alcón (1), Jorge Olivar Ruiz (1), Isabel González González (1), Lucía Yáñez Rausell (1), Aitor Ameztegui (2)

(1) Agresta Sociedad Cooperativa.
(2) 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:

Martín, S; Olivar, J.; et al. 2055. Guía técnica "Técnicas de modelización y teledetección para la gestión adaptativa de los pinares ibéricos de pino carrasco".

DEPÓSITO LEGAL: MU 339-2025

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

TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN Y TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LOS PINARES IBÉRICOS DE 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

TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN Y TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

12

5.1.	JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES	12
5.2.	EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL HÁBITAT ACTUAL Y FUTURA	14
5.3.	DETECCIÓN Y MONITOREO DE LOS PROCESOS DE DECAIMIENTO	17

6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

21

7

REFERENCIAS

22

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 silvicultura 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.

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 e 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 al 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

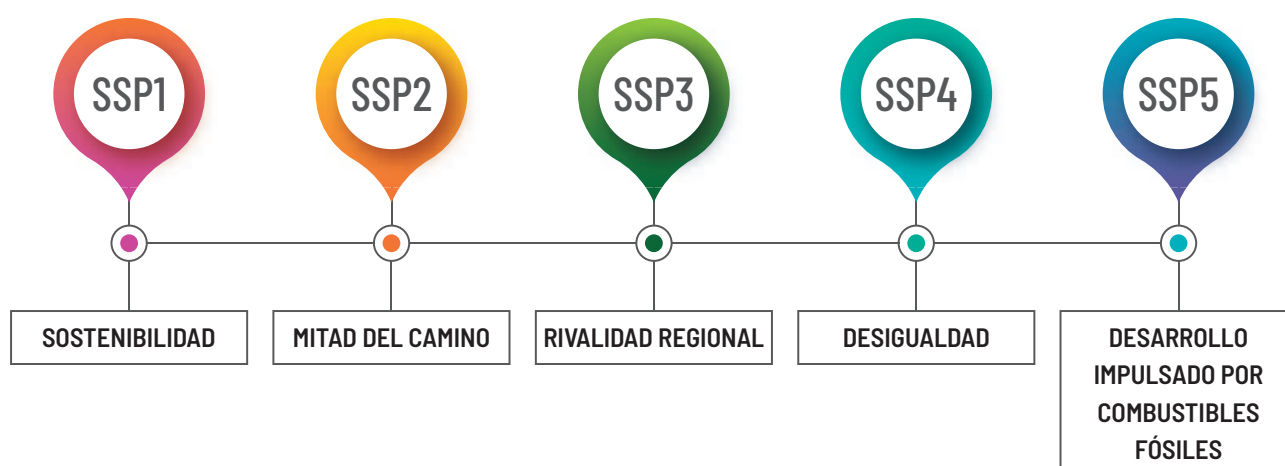
Flota de satélites de la Agencia Espacial Europea, que forman una constelación bajo diferentes misiones y cuyos satélites proveen de imágenes ópticas y datos radar que pueden ser descargadas gratuitamente y a máxima resolución.

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.

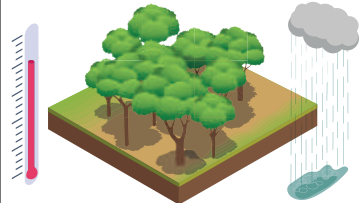
TRAYECTORIAS SOCIOECONÓMICAS COMPARTIDAS (SSP)

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

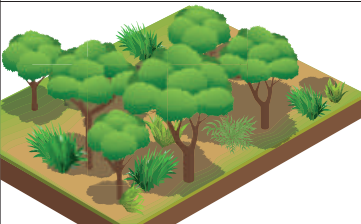

REQUERIMIENTOS EDÁFICOS

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 (*Hieraetus 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

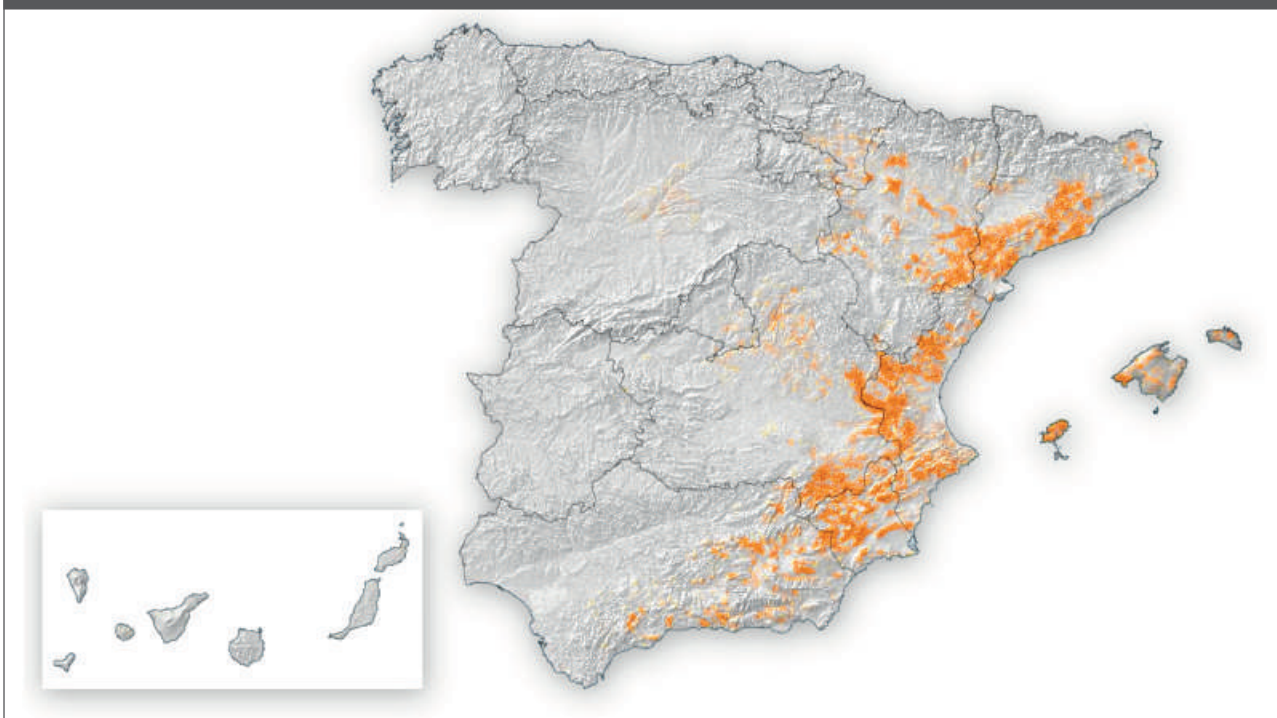
En las áreas montañosas y prelitorales, los pinares de pino carrasco también son comunes. Las sierras y montañas que bordean el Mediterráneo, como las sierras de Alicante, Murcia y Granada, proporcionan un hábitat adecuado para estos bosques. Aquí, el pino carrasco puede encontrarse en altitudes variables,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

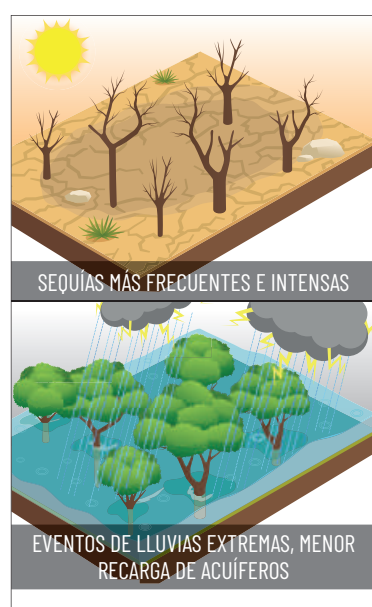
El aumento de la temperatura puede causar estrés térmico en los pinos carrascos, afectando su metabolismo y fotosíntesis. Esto puede reducir su crecimiento y vigor, haciendo a los árboles más susceptibles a otras amenazas como plagas y enfermedades.

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

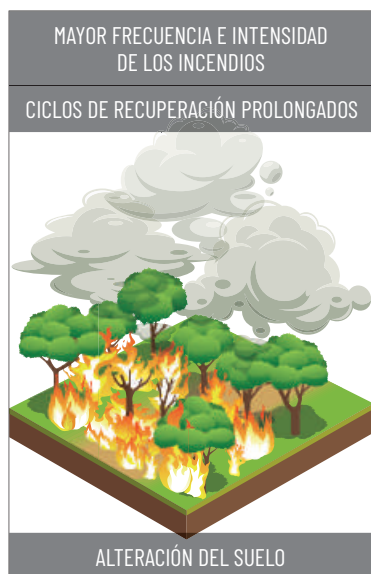
Las sequías prolongadas pueden reducir la disponibilidad de agua en el suelo, lo que afecta directamente la capacidad de los pinos carrascos para absorber el agua necesaria. Esto puede llevar a un aumento en la mortalidad de los árboles, especialmente de los más jóvenes y menos establecidos.

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. TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN Y TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO

5.1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

Los bosques desempeñan un papel crucial en la regulación del clima global, el ciclo del agua y la biodiversidad, pero también son altamente vulnerables a los cambios en la temperatura, el régimen de lluvias y las alteraciones en las estaciones de crecimiento. El monitoreo de los efectos del cambio climático en los bosques es fundamental para comprender las transformaciones que estos ecosistemas experimentan y anticipar posibles impactos futuros.



En el contexto mediterráneo, esta tarea adquiere una relevancia particular debido a las características únicas de la región. Los bosques mediterráneos enfrentan desafíos significativos, como sequías más intensas y frecuentes, incendios forestales exacerbados por las temperaturas extremas, y la proliferación de plagas y enfermedades asociadas a las nuevas condiciones climáticas. Estas amenazas ponen en riesgo no solo los servicios ecosistémicos que brindan, como la provisión de agua y la protección del suelo, sino también la sostenibilidad de las comunidades humanas que dependen de ellos. El monitoreo continuo permite evaluar la vulnerabilidad de estos ecosistemas y detectar indicadores tempranos de deterioro, facilitando así la toma de decisiones de gestión basadas en evidencia.

El monitoreo es clave para la implementación de acciones de adaptación que reduzcan los impactos del cambio climático en los bosques mediterráneos y, en particular, en el hábitat de los pinares ibéricos de pino carrasco. Estrategias como la reforestación con especies más resistentes a la sequía, la gestión sostenible del agua y la prevención de incendios pueden diseñarse con mayor precisión al comprender cómo los bosques mediterráneos responden a los cambios climáticos. Además, el seguimiento continuo permite ajustar las estrategias en función de la evolución de las condiciones climáticas y ecológicas, garantizando respuestas efectivas a largo plazo.

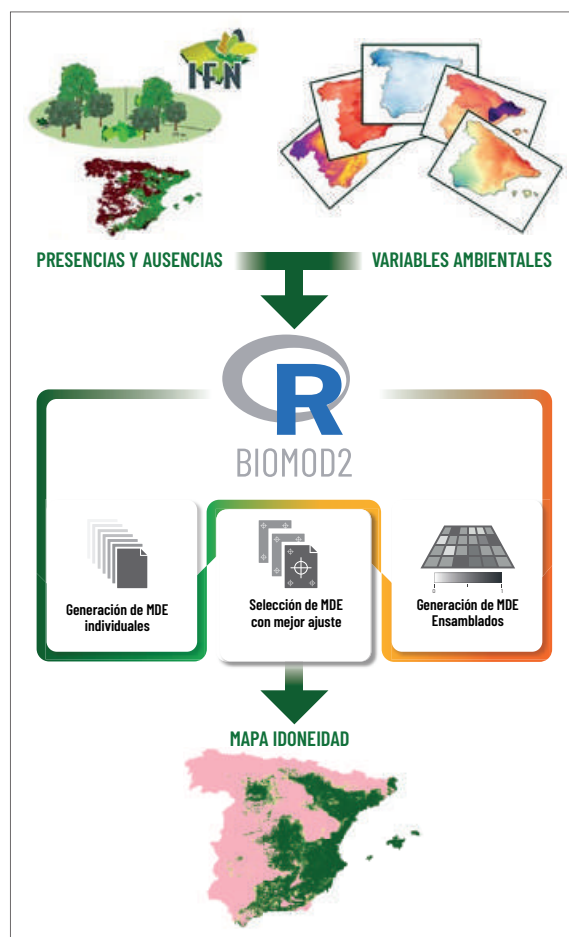


Esta guía proporciona una metodología estructurada y replicable para evaluar la idoneidad del hábitat de *Pinus halepensis* y monitorizar su decaimiento. Se presentan herramientas y enfoques que pueden ser aplicados en diferentes regiones y hábitats forestales, adaptando en cada caso a las particularidades locales.

5.2. EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DEL HÁBITAT ACTUAL Y FUTURA

Está previsto que el aumento de las temperaturas y los cambios de los regímenes de precipitaciones asociados al cambio climático conlleven la traslocación geográfica de los hábitats adecuados para las especies vegetales. Las especies que pasen a vegetar en áreas con condiciones no idóneas podrán sufrir más estrés, reducir su productividad e incluso tener dificultades para regenerarse.

Para tratar de anticipar esta situación y evaluar el riesgo potencial de que un determinado enclave dentro del área ocupada actualmente por el hábitat del pino carrasco se encuentre en dificultades a consecuencia del cambio climático, se recomienda estudiar la idoneidad del hábitat actual, así como su proyección a periodos y escenarios climáticos futuros. Este estudio se basa habitualmente en la generación de Modelos de Distribución de Especies (MDE). Estos modelos emplean algoritmos que relacionan estadísticamente las localizaciones en las que una especie está presente con una serie de variables ambientales para después extrapolar esta relación a un área de interés y predecir la idoneidad para la especie en dicha área. La predicción de distintos modelos de distribución para distintos periodos futuros y escenarios climáticos permite estimar cambios en la superficie considerada idónea para el hábitat del pino carrasco.



EL PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA ESTE ANÁLISIS ES EL SIGUIENTE

RECOLECCIÓN DE DATOS AMBIENTALES

1

Se deben obtener datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad), edáficos (textura del suelo, pH) y topográficos relevantes para la especie.

Existen diversas fuentes de datos climáticos, como WorldClim y ARCO ERA5, que pueden utilizarse para estudios climáticos y modelización. Sin embargo, es crucial analizar su consistencia y calidad, ya que algunas variables pueden manifestar inconsistencias en sus patrones geográficos. Muchas de estas fuentes se basan en interpolaciones espaciales, lo que puede afectar su precisión en regiones con baja densidad de estaciones meteorológicas. Además, la resolución espacial varía, como en el caso de WorldClim con 30 segundos de arco (~1 km²), y el periodo histórico considerado es un factor clave, ya que las estimaciones pueden basarse en diferentes rangos temporales (por ejemplo, 1970-2000 para WorldClim). La selección adecuada de estos datos es esencial para garantizar la fiabilidad de los análisis y modelos climáticos.

En relación a los datos edáficos, existen valiosas y completas fuentes de datos espaciales como SoilGrids. No obstante, previamente a su uso es fundamental analizar su consistencia y calidad, ya que en ciertos lugares su precisión es aún limitada, debido aspectos como la distribución y representatividad de los datos de entrada, la falta de datos confiables de alta resolución para factores clave en el análisis de suelos, etc.

SELECCIÓN DE REGISTROS DE PRESENCIA Y AUSENCIA DEL HÁBITAT

2

Se recomienda integrar datos de inventarios forestales, observaciones de campo y bases de datos georreferenciadas.

En España, el Inventario Forestal Nacional (IFN) es una fuente clave de datos para conocer las presencias y ausencias de las especies forestales. Su información es especialmente útil para entrenar y validar modelos de distribución de especies, permitiendo analizar la relación entre la presencia de determinadas especies y las condiciones ambientales. Sin embargo, su uso requiere una adecuada selección y tratamiento de los datos para evitar sesgos en los análisis. Algunos aspectos clave son:

- *Definición de presencia y ausencia: se deben establecer criterios claros como, por ejemplo, considerar presencias aquellas parcelas con al menos tres individuos sanos de la especie objetivo.*
- *Corrección del sesgo de ausencias en zonas de límite arbóreo (frío, árido, etc.): dado que el IFN solo muestrea coberturas arboladas, no proporciona ausencias en los límites árido o frío del hábitat de algunas especies, siendo necesario extraerlas de otras fuentes de datos.*
- *Filtrado para evitar sesgo espacial y autocorrelación: puede ser necesario eliminar registros demasiado cercanos entre sí para conseguir un conjunto de datos más equilibrado y representativo.*
- *Equilibrio entre presencias y ausencias para evitar un desbalance en los modelos.*

MODELIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN

3

Se sugiere emplear algoritmos como MaxEnt, Random Forest y modelos ensamblados para generar predicciones robustas.

Para utilizar Modelos de Distribución de Especies (MDE) en la evaluación de la idoneidad de un hábitat en un área determinada, es recomendable emplear el paquete de R "biomod2", que permite generar modelos individuales con 12 algoritmos distintos. En lugar de depender de un solo algoritmo, se sugiere combinar varios mediante modelos ensamblados, lo que ayuda a reducir sesgos y mejorar la fiabilidad de las predicciones.

El proceso comienza con la selección de las variables predictoras. Se recomienda realizar un análisis de colinealidad para reducir el conjunto inicial de variables ambientales. Esto se puede hacer mediante el cálculo del Factor de Inflación de la Varianza (VIF). Una vez obtenido un conjunto de variables no colineales, es necesario determinar el número óptimo de predictores a incluir en el modelo. Para ello, se sugiere utilizar el método de optimización del Área Bajo la Curva (AUC) con el algoritmo Random Forest (RF), a través del paquete de R "AUCRF". Además, se puede evaluar la importancia relativa de cada variable en la predicción del modelo mediante la estimación del índice Gini (Mean Decrease Gini, MDG), lo que permite priorizar aquellas variables con mayor influencia en el desempeño del modelo.

Posteriormente se deben generar los modelos individuales, para lo cual se recomienda ejecutar múltiples iteraciones por algoritmo y seleccionar aquellos con mejor ajuste. La evaluación de la calidad de los modelos debe basarse en métricas como AUC, que mide la capacidad discriminativa; Kappa de Cohen, que estima la precisión del mapa generado; y TSS, que valora la diferencia entre la precisión real y la esperada al azar.

Una vez seleccionados los mejores modelos individuales, se pueden ensamblar combinando sus predicciones mediante métodos como la mediana. Posteriormente, el modelo ensamblado debe ser evaluado con las mismas métricas utilizadas en los modelos individuales.

PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS

4

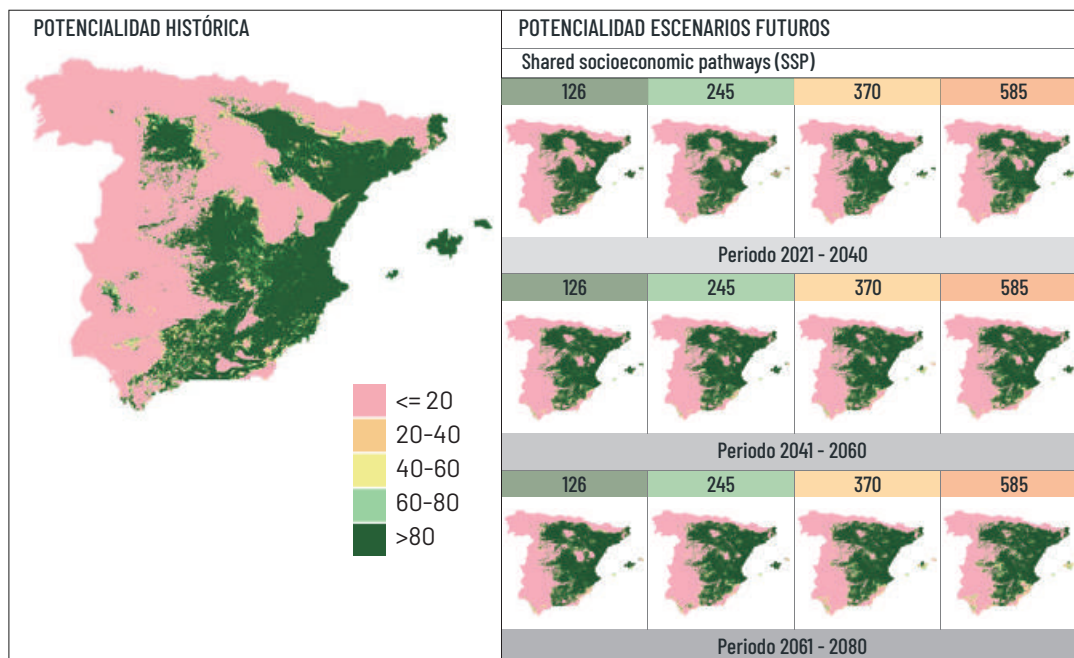
Se deben evaluar distintas trayectorias climáticas futuras basadas en modelos CMIP6, considerando diferentes trayectorias socioeconómicas (SSP).

Los MDE generados podrán aplicarse posteriormente a los escenarios climáticos futuros considerados. Para ello deberán proyectarse a futuro las variables climáticas utilizadas. Se recomienda proyectar las variables climáticas empleando una batería de modelos climáticos globales (MCG), considerando escenarios futuros a corto, medio y largo plazo (por ejemplo, '2021-2040', '2041-2060', '2061-2080') y diferentes trayectorias socioeconómicas (por ejemplo, '126', '245', '370', '585'). Los SSP se refieren a los escenarios de cambios socioeconómicos globales proyectados hasta 2100, en inglés conocidos como Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Para cada período de tiempo y SSP, se recomienda utilizar la mediana de los valores proyectados de las variables climáticas del conjunto de los MCG usados.

GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA

5

Se recomienda utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la representación visual y análisis de la idoneidad del hábitat.



ACTUALIZACIÓN Y MEJORA CONTINUA

6

Debido a la constante evolución del conocimiento científico y la disponibilidad de nuevos datos, es fundamental establecer un proceso de actualización y mejora continua en los productos generados.

Uno de los principales aspectos a revisar periódicamente es la base de datos climáticos utilizada. Es necesario tener en cuenta que periódicamente se publican nuevas bases de datos o versiones mejoradas. Estas incorporan avances en metodologías de modelización y técnicas de downscaling, lo que podría influir en la calidad de las predicciones y justificar su inclusión en futuras actualizaciones.

Del mismo modo, los escenarios climáticos y socioeconómicos recomendados provienen del CMIP6, base del último informe del IPCC (2022). Los cuatro escenarios empleados reflejan diferentes trayectorias de evolución socioeconómica y emisiones de gases de efecto invernadero, pero, al igual que con los datos climáticos, estos modelos son objeto de continua revisión y actualización, lo que hace recomendable su reevaluación en el futuro.

Otro aspecto clave es la resolución espacial de los mapas de idoneidad, que viene determinada por la resolución de las variables ambientales utilizadas en la modelización. Para superar limitaciones en este aspecto, puede ser recomendable aplicar técnicas de escalado (downsampling) basadas en funciones de transferencia topográfica, permitiendo una mayor resolución en toda la superficie analizada.

LA DETECCIÓN TEMPRANA DEL DECAIMIENTO ES ESENCIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANEJO QUE PERMITAN MITIGAR SUS EFECTOS Y PRESERVAR LA FUNCIONALIDAD DEL ECOSISTEMA.



5.3. DETECCIÓN Y MONITOREO DE LOS PROCESOS DE DECAIMIENTO

El decaimiento de los bosques es un proceso progresivo de debilitamiento que puede estar influenciado por múltiples factores ambientales y antropogénicos. Entre las principales causas se encuentran el estrés hídrico, las plagas y enfermedades. En el caso del hábitat del pino carrasco, la predisposición de su nicho ecológico a sufrir condiciones extremas como sequías prolongadas y altas temperaturas, lo hace especialmente vulnerable.

La detección temprana del decaimiento es esencial para la implementación de estrategias de manejo que permitan mitigar sus efectos y preservar la funcionalidad del ecosistema. Para ello, es necesario un enfoque basado en la integración de datos de teledetección y mediciones de campo, permitiendo la identificación de patrones espaciales y temporales de deterioro. El uso de series temporales de imágenes satelitales es altamente conveniente, ya que este fenómeno es un proceso lento y gradual que requiere de una observación continuada para su pronta detección y gestión. Las imágenes satelitales permiten capturar cambios sutiles en la vegetación a lo largo del tiempo, identificando variaciones en la cobertura, el vigor y la salud del bosque incluso antes de que los efectos sean visibles a simple vista. Además, la disponibilidad de datos históricos y la alta frecuencia de adquisición de imágenes facilitan el entrenamiento de los algoritmos de detección con observaciones de daños históricos.

EL PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA LOS TRABAJOS DE DETECCIÓN DE LOS PROCESOS DE DECAIMIENTO ES EL SIGUIENTE

CREACIÓN DE BASE DE DATOS DE DAÑOS OBSERVADOS

1

La elaboración de análisis y productos cartográficos basados en teledetección requiere del uso de bases de datos de entrenamiento, calibración o validación de algoritmos. En este caso, disponer de datos históricos de daños es fundamental para lograr resultados fiables.

En el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO se trabajó con un número elevado de bases de datos de daños en los bosques disponibles en España (red Europea/Nacional de Daños en los Bosques, redes regionales de Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana, Andalucía, etc.). En estos trabajos se constató que las bases de datos nacionales y regionales exploradas no fueron diseñadas con el objetivo de utilizar la información en estudios de teledetección. Para poder explotar en este marco de análisis todas estas valiosas fuentes de datos, se recomienda replantear determinados aspectos de su diseño, especialmente: establecer parcelas debidamente delimitadas y localizadas con precisión; establecer los límites de las parcelas basándose en criterios de uniformidad topográfica, de composición y cobertura de la vegetación, y de estado sanitario; y establecer parcelas de control próximas (en distancia y características) a las áreas afectadas por diferentes niveles y agentes de daño.

En ausencia de este tipo de bases de datos, resulta muy conveniente la realización de una campaña de recogida de datos en campo, adecuadamente diseñada para capturar una muestra representativa tanto en niveles de severidad del daño observado, como en otros factores que potencialmente pueden afectar a las relaciones analizadas (cobertura arbórea, exposición topográfica, etc.).

SELECCIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES

2

Se recomienda testar diferentes índices espectrales analizando su comportamiento en eventos de decaimiento conocidos para evaluar su capacidad de reflejar la pérdida de vigor y detectar estrés hídrico en la vegetación.

Existe una importante diversidad de índices de vegetación que se han demostrado útiles en el seguimiento del estado hídrico de la vegetación forestal. Generalmente son índices útiles para este propósito aquellos que emplean las bandas espectrales que aportan información relevante sobre el estado de la vegetación y el contenido de humedad, especialmente las bandas del rojo, borde del rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Es importante destacar que la banda del borde del rojo captura información espectral en una región del espectro electromagnético sensible a los cambios de estructura y salud de la vegetación. Algunos de los índices de interés son:

- NBR (Normalized Burn Ratio)
- PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)
- NREDI (Red-edge ratio Normalized Vegetation Index)
- IRECI (Inverted Red-Edge Chlorophyll Index).
- SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)
- DSWI (Disease Water Stress Index)
- NMDI (Normalised Multi-band Drought Index)
- NDMI (Normalized Difference Moisture Index)
- TCW (Tasseled Cap Wetness)

Los trabajos desarrollados en el marco del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO han manifestado también la importancia del periodo utilizado para la generación de los mosaicos anuales. Así, los periodos de inicio de la actividad vegetativa tras las paradas invernal o estival parecen especialmente interesantes en la detección de los procesos de decaimiento.

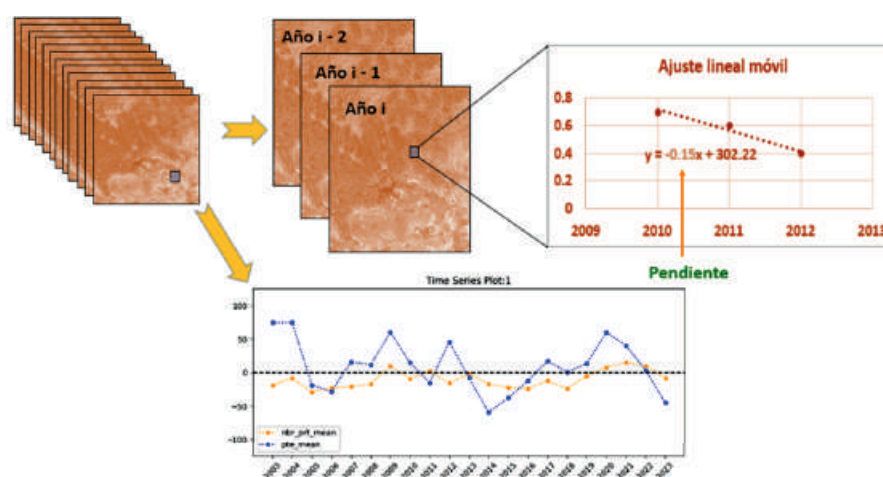
ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES

3

La aplicación de algoritmos como LandTrendR en series temporales de imágenes satélite permite identificar tendencias de degradación a largo plazo, aunque son poco sensibles a cambios leves o graduales, por ello se recomienda testar otras técnicas con mayor sensibilidad, como el ajuste lineal móvil en ventanas de 3 años.

El procedimiento metodológico del ajuste lineal móvil en ventanas de 3 años parte de la generación de compuestos anuales durante el periodo de análisis, a partir de los cuales se construye la serie temporal del índice o los índices evaluados. Posteriormente, a partir del análisis de dicha serie, se derivan dos productos clave:

- La pendiente resultante del ajuste lineal móvil para cada píxel y año, considerando datos de ese año y de los dos años anteriores.
- El porcentaje de desviación del NBR respecto a la mediana del periodo analizado (idealmente superior a 10 años).



CLASIFICACIÓN DE LA SEVERIDAD

4

Una vez detectados los eventos de decaimiento es conveniente establecer umbrales de afectación para diferenciar entre niveles leves, moderados y graves de decaimiento, y así poder realizar diagnósticos y recomendaciones de gestión acordes a la gravedad del evento.

En primer lugar, para la propia detección de los eventos de decaimiento es conveniente la aplicación de un umbral de severidad con el propósito de eliminar aquellas pendientes elevadas originadas por cambios abruptos, como, por ejemplo, la sucesión de incendios forestales, aprovechamientos forestales, etc. La determinación de este umbral se debería fundamentar en un análisis a nivel regional en el cual se contrastan los perímetros de las perturbaciones severas registradas durante el lapso transcurrido entre dos compuestos, con los valores de pendiente observados en el segundo compuesto de dicho periodo. Analizando el comportamiento espectral de estas perturbaciones severas, se pueden utilizar diferentes métodos establecer un umbral de pendiente que diferencie los cambios bruscos de los cambios graduales o progresivos.

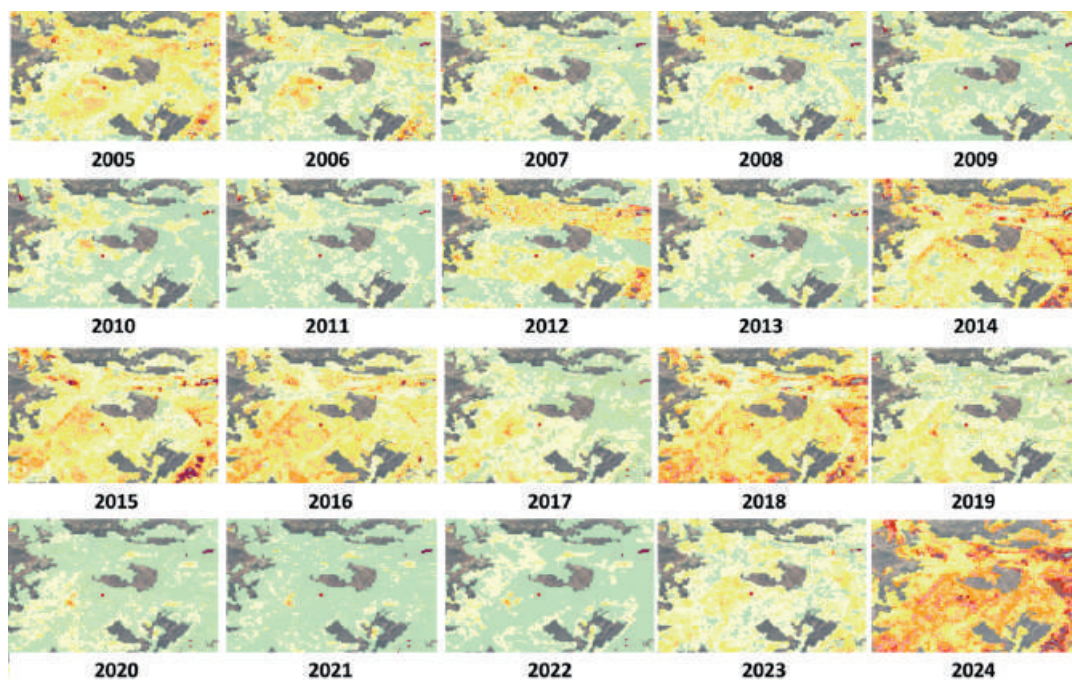
Por otro lado, la severidad de los eventos de decaimiento se puede establecer en base al porcentaje de desviación del índice por píxel y año con respecto a la mediana del periodo analizado. Para establecer los rangos de severidad en niveles (por ejemplo: baja, media y alta), se puede proceder de diferentes maneras, entre ellas:

- Analizando el histograma de valores de la desviación del índice respecto a la mediana del periodo y creando clases mediante diferentes técnicas de partición del histograma (por ejemplo, intervalos iguales, percentiles, natural jenkins, etc.).
- Calibrando los valores frente a datos de severidad del daño recogidos en campo, si se dispone de datos históricos, con la finalidad de establecer niveles de severidad a partir de dichos datos de entrenamiento utilizando técnicas de clasificación supervisada o modelización.

GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA

5

Se recomienda utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la representación visual y análisis de los resultados de monitoreo de los eventos de decaimiento forestal.



ACTUALIZACIÓN Y MEJORA CONTINUA

6

Debido a la constante evolución del conocimiento científico y la disponibilidad de nuevos datos, es fundamental establecer un proceso de actualización y mejora continua en los productos generados. Entre las líneas de trabajo que deberían permanecer abiertas al enfrentar un trabajo de diagnóstico de este tipo, destacan la creación de bases de datos de campo válidas para análisis de teledetección, la integración de datos de diferentes sensores (e. g., Sentinel-2, Landsat, etc.) y la optimización de los algoritmos de detección de eventos de decaimiento.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta guía técnica desarrolla la aplicación de técnicas de modelización y teledetección para la gestión adaptativa de los pinares ibéricos de pino carrasco (*Pinus halepensis*) en el contexto del cambio climático.

La evaluación de la idoneidad del hábitat, tanto actual como futura, permite a los gestores forestales identificar áreas que serán más adecuadas para el pino carrasco en el futuro, así como aquellas que pueden volverse menos aptas debido a los cambios en el clima. Esta información es fundamental para la planificación de estrategias de conservación, como la migración asistida, que implica la reubicación de especies y/o genotipos a áreas donde las condiciones climáticas serán más favorables en el futuro. Así mismo, proporciona información necesaria para la toma de decisiones selvícolas en aspectos como:

- Promoción o fomento de diferentes especies dentro de una masa mixta, en función de la idoneidad actual y futura.
- Elección de tratamientos de regeneración acordes a las condiciones ambientales a las que se va a enfrentar la masa forestal.
- Selección de la intensidad de los tratamientos selvícolas aplicados (claras, clareos, cortas selectivas, regímenes de aclareo sucesivo, etc.) de manera acorde a las condiciones ambientales a las que se va a enfrentar la masa forestal.

SELECCIÓN DE LA INTENSIDAD DE LOS TRATAMIENTOS SELVÍCOLAS ACORDE A LAS CONDICIONES AMBIENTALES A LAS QUE SE VA A ENFRENTAR LA MASA FORESTAL



Por su parte, el uso de la teledetección para el monitoreo de los procesos de decaimiento forestal proporciona una visión sinóptica y continua de la salud de los bosques. La detección temprana de los síntomas de decaimiento, como la pérdida de vigor o el estrés hídrico, permite a los gestores forestales intervenir de manera oportuna para mitigar los daños y mejorar la resiliencia de los bosques. El conocimiento de la existencia de eventos de decaimiento prolongados o recurrentes en un determinado lugar, o en el sentido contrario, la ausencia de estos episodios en una determinada masa forestal, constituyen informaciones clave que facilitarán al gestor la toma de decisiones selvícolas en aspectos como los descritos anteriormente (fomento o promoción de especies, elección de tratamientos, o de intensidades de dichos tratamientos).

Fruto del trabajo desarrollado en el proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO en torno al uso de técnicas de modelización y teledetección enpara la gestión adaptativa de los pinares ibéricos de pino carrasco.

Se pueden realizar las siguientes recomendaciones generales:

- Promover la aplicación de estas técnicas: En el proyecto se ha realizado una implementación demostrativa de las técnicas de modelización y teledetección al monitoreo de los efectos del cambio climático en los pinares de pino carrasco, demostrando su utilidad, pero también manifestando la dificultad técnica de dichos desarrollos. Se considera fundamental que este tipo de herramientas se integren en los programas de gestión forestal a nivel regional y nacional. Se deben desarrollar protocolos y directrices claras para su aplicación y dotar de los presupuestos necesarios para su adecuado desarrollo y actualización periódica.
- Fomentar la investigación: Aunque en las últimas décadas se han producido avances importantes en este tipo de técnicas de análisis de datos, se considera necesario seguir invirtiendo en investigación en nuevas metodologías, algoritmos y fuentes de datos que permitan una evaluación cada vez más precisa y continua de la idoneidad del hábitat y el seguimiento de la salud forestal.
- Se debe fomentar la investigación en sistemas de monitoreo continuo de los bosques, con el objetivo de avanzar en la detección temprana de procesos de deterioro forestal.
- Fortalecer la colaboración e integración de datos: Se considera crucial fortalecer la colaboración entre científicos, administraciones públicas, consultoras especializadas, gestores forestales, propietarios de tierras y otros actores involucrados en la gestión de los bosques. El intercambio de información entre todos los actores haría posible la integración de datos de diferentes fuentes, la optimización en la recogida de dichos datos y la definición de líneas de trabajo y objetivos comunes, que permitan mejorar la eficiencia y aplicabilidad de los productos desarrollados.
- Difusión de la información: Es importante difundir la información generada a través de estas técnicas a los gestores forestales, propietarios de tierras y al público en general. Esto permitirá una mayor concienciación sobre los desafíos del cambio climático y la importancia de la gestión adaptativa. Las informaciones y herramientas desarrolladas deberían ser de uso sencillo, y enfocarse hacia la generación de diagnósticos claros y precisos, para que realmente acaben materializándose en mejoras en la gestión forestal adaptativa de los bosques.

7. REFERENCIAS

ARCO ERA5:

<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

BANQUÉ CASANOVAS, M., VAYREDADURAN, J, MARTÍNEZ-VILALTA, J. Monitoreo del decaimiento de los bosques de Cataluña: Proyecto DEBOSCAT (2013).

COHEN W.B., YANGB Z., HEALEYC S.P., KENNEDYD R.E., GORELICK N. A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection (2018).

Departamento de Equilibrios Biológicos Servicio de Gestión Forestal Sostenible Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Red Andaluza de Seguimiento de Daños sobre Ecosistemas Forestales (Red Seda).

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/andalucia_tcm30-527333.pdf

Dirección General de Gestión Forestal, Servicio de Planificación y Gestión Forestal. Redes de Evaluación Fitosanitaria en las Masas Forestales de Aragón.

https://bibliotecavirtual.aragon.es/i18n/catalogo_imagenes/grupo.do?path=3714823

FICK, S.E. and R.J. HIJMANS, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 37 (12): 4302-4315. <https://www.worldclim.org/data/index.html>

FIREURISK consortium. D3.1 – Downscaled CMIP5 and CMIP6 climate scenarios for selected PS and DA. FIREURISK PROJECT- DEVELOPING A HOLISTIC, RISK-WISE STRATEGY FOR EUROPEAN WILDFIRE MANAGEMENT (2022).

https://fireurisk.eu/wp-content/uploads/2024/05/FirEUrisk_D3.1_Downscaled-CMIP5-and-CMIP6-climate-scenarios-for-selected-PS-and-DA.pdf

GANDULLO J.M., SÁNCHEZ-PALOMARES O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. Colección Técnica, ICONA, Madrid.

Inventario Forestal Nacional (IFN):

<https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional.html>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University.

LandTrendr-GEE Guide

<https://emapr.github.io/LT-GEE/api.html>

MITECO. Red Europea de Daños en los Bosques, Nivel I.

https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_nivel_I_danos.aspx#:~:text=Se%20trata%20de%20una%20red,de%2016%20x%2016%20Km.

RUIZ DE LA TORRE, J. Flora mayor. Organismo Autónomo Parques Nacionales. (2006)

POGGIO, L., DE SOUSA, L. M., BATJES, N. H., HEUVELINK, G. B. M., KEMPEN, B., RIBEIRO, E., AND ROSSITER, D. (2021) SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, SOIL, 7, 217-240.

<https://www.isric.org/explore/soilgrids>



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

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

GUÍA TÉCNICA



TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN Y TELEDETECCIÓN PARA LA GESTIÓN ADAPTATIVA DE LOS PINARES IBÉRICOS DE PINO CARRASCO"



Universitat
de Lleida



Universidad de
Castilla-La Mancha



UNIVERSITAT
POLITÉCNICA
DE VALÈNCIA