



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1657

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





DetECCIÓN DE DECAIMIENTO EN PINARES DE *Pinus halepensis* MEDIANTE EL USO DE SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES SATELITALES

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, I. (1), ESTEBAN CAVA, J. (1), MAS GISBERT, H. (2), TOMÉ MORÁN, J. L. (1), MARTÍN ALCÓN, S. (1)

(1) Agresta Sociedad Cooperativa

(2) Laboratori de Sanitat Forestal. CIEF. VAERSA- Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Infraestructures i Territori (Generalitat Valenciana).

Resumen

Se presenta un trabajo desarrollado en el contexto del proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO), enfocado al desarrollo de nuevas herramientas para la adaptación de los bosques ibéricos de pino carrasco al cambio climático, así como su aplicación demostrativa. En este marco se desarrolló una metodología para la detección y evaluación de procesos de decaimiento en el hábitat de *Pinus halepensis* en la Península Ibérica y Baleares, basada en el análisis de series temporales de imágenes satelitales Landsat. La metodología emplea un análisis de tendencias basado en índices espectrales para identificar disminuciones en el vigor de la vegetación de carácter leve o moderado, pero perpetuadas a lo largo de varios años. El trabajo se centra en la detección del estrés hídrico como principal factor detonante del decaimiento forestal, normalmente agravado después por la incursión de agentes bióticos, como los escolítidos, los hongos o el muérdago.

La exactitud de la metodología de detección de eventos de decaimiento se comparó con los datos de campo recogidos por Agresta durante la campaña de septiembre de 2023, mostrando una precisión global del 75% en masas con FCC superior al 30%, y del 85% si limitamos el análisis a las masas de mayor cobertura (FCC > 60%).

Extendiendo el análisis al año 2024 los resultados indican que la severa sequía experimentada en 2023 provocó que, en 2024, el 30 % de la superficie de pino carrasco presentara niveles de severidad media-alta o grave, mientras que el 51 % se clasificó como de severidad nula o baja. El monitoreo anual y continuo mediante esta metodología se perfila como una herramienta clave para identificar las masas forestales más vulnerables al ataque de agentes bióticos y para implementar medidas preventivas de manera anticipada.

Palabras clave

Cambio Climático, estrés por sequía, pino carrasco, Teledetección satelital, Monitoreo forestal, Landsat

1. Introducción

El cambio climático (CC) plantea desafíos significativos para la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas forestales mediterráneos, donde el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) desempeña un papel crucial. Esta especie, ampliamente distribuida en el entorno circunmediterráneo y con más de 2 millones de hectáreas en España, constituye un componente esencial de los



bosques del Mediterráneo occidental. Sin embargo, los escenarios proyectan para el espacio ocupado por su hábitat una aceleración en el aumento de las temperaturas y reducciones entre leves y moderadas en las precipitaciones, lo que provocará un incremento general de la aridez. Asimismo, se espera una mayor frecuencia de eventos extremos, como altas temperaturas y bajas precipitaciones, generando sequías más frecuentes y severas. El aumento del estrés hídrico asociado a sequías más prolongadas e intensas podría conducir a cambios en las tasas de mortalidad y regeneración de las especies vegetales, afectando el rango actual de distribución de plantas y causando la desaparición o reemplazo de ciertas especies por otras (CRAMER et al., 2020).

Los impactos del CC son ya evidentes en los pinares mediterráneos de pino carrasco en la Península Ibérica e Islas Baleares. Durante las últimas décadas se han registrado grandes períodos de sequía y extensos incendios forestales. Asimismo, han ocurrido episodios severos de plagas forestales, en particular escolítidos (especialmente *Tomicus* spp.) y procesionaria (*Thaumetopea pityocampa*), que generalmente han seguido a los eventos de sequía más intensos, ocasionando elevadas tasas de mortalidad en amplias superficies o significativas pérdidas de vigor en el caso de la procesionaria (GUILLEN-CLIMENT et al., 2020). Ante este panorama, la implementación de medidas de gestión forestal adaptativa se ha vuelto urgente y prioritaria. Para ello, el monitoreo del estado sanitario de los bosques se perfila como una herramienta fundamental, con el objetivo de generar información de apoyo a la toma de decisiones de gestión forestal adaptativa, que contribuyan a minimizar el impacto de los eventos de decaimiento sobre los espacios forestales.

El uso de series temporales de imágenes Landsat ha sido ampliamente reconocido como una herramienta eficaz para monitorear la salud de los bosques y la detección de procesos de decaimiento forestal. La capacidad de estos sensores para registrar información multiespectral durante más de cuatro décadas ha permitido estudiar cambios en índices de vegetación, como el NDVI, con gran precisión y consistencia. Estudios pioneros, como el de COHEN et al. (1998), demostraron el potencial de Landsat para evaluar cambios estructurales en ecosistemas forestales. Posteriormente, KENNEDY et al. (2010) desarrollaron el algoritmo LandTrendr, optimizado para detectar y analizar perturbaciones forestales a partir de series temporales. Asimismo, VOGELMANN et al. (2012) utilizaron estos datos para identificar dinámicas de recuperación y estrés en bosques a gran escala. Más recientemente, HUANG et al. (2020) y SENF et al. (2021) han mostrado como se pueden integrar datos Landsat con variables climáticas y modelos predictivos en el seguimiento del estado sanitario de los bosques, destacando el papel del cambio climático en los procesos de decaimiento forestal.

El proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO busca desarrollar nuevas herramientas para la adaptación de los bosques ibéricos de pino carrasco al cambio climático. Estas herramientas están enfocadas en la detección temprana de los procesos de decaimiento y en la mejora de la resiliencia del ecosistema, fortaleciendo su vigor, su capacidad de adaptación a la aridificación climática y su habilidad para recuperarse tras perturbaciones naturales. Este estudio, en particular, se centra en

la detección temprana del decaimiento en masas de *Pinus halepensis*, desarrollando e implementando una metodología para su cartografía y análisis con el objetivo de superar las limitaciones actuales en el seguimiento de estos procesos.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es desarrollar e implementar herramientas basadas en teledetección para la detección y evaluación de procesos de decaimiento forestal en los bosques ibéricos de pino carrasco (*Pinus halepensis*), asegurando un seguimiento anual y continuo. Esto incluye identificar áreas afectadas por estrés hídrico y evaluar la severidad de los daños mediante análisis espectrales de imágenes satelitales Landsat. Además, el estudio busca proporcionar a los gestores forestales productos cartográficos que puedan integrarse en visores y sistemas de descarga, facilitando la planificación y adopción de medidas preventivas frente a eventos de decaimiento forestal.

3. Metodología

a. Ámbito de estudio

El alcance geográfico del estudio abarca el área de distribución del pino carrasco en la Península Ibérica e Islas Baleares (Figura 1). En el marco del LIFE ADAPT-ALEPPO se desarrolló un producto cartográfico para delimitar con la mayor precisión posible lo que hoy en día son pinares de *P. halepensis*. Para ello se utilizaron las últimas actualizaciones de la Foto Fija ligada al Mapa Forestal de España elaborado por el MITECO (2009, 2012, 2015, 2018), junto con perímetros de incendios recientes del sistema EFFIS del servicio Copernicus de la ESA, y la cartografía de cobertura de vegetación proporcionada por el compuesto de la primera cobertura LiDAR del PNOA, del Instituto Geográfico Nacional.

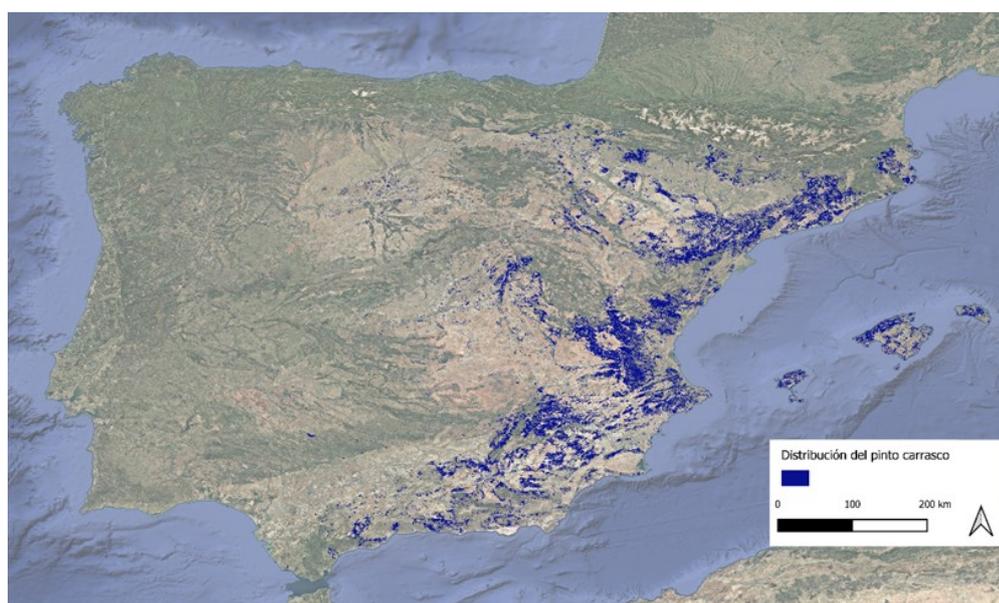


Figura 1. Distribución del *Pinus halepensis* en la Península Ibérica y Baleares. Fuente:

LIFE adapt-aleppo.

3.

a. **Muestreo de campo**

En septiembre de 2023, Agresta llevó a cabo una inspección de campo con el objetivo de verificar los procesos de decaimiento detectados. El diseño del muestreo se fundamentó en la información proporcionada por técnicos de sanidad forestal de Aragón, Cataluña y la Comunidad Valenciana, quienes identificaron áreas donde se habían observado síntomas de decaimiento en los últimos años.

Para cada comunidad autónoma se seleccionaron cinco áreas de distintos tamaños, en las cuales se preseleccionaron entre dos y seis puntos dependiendo de su extensión. En total, se definieron 72 puntos buscando garantizar una muestra representativa en términos de variabilidad en los parámetros severidad del daño y Fracción de Cobertura Cubierta (FCC). Los puntos se seleccionaron considerando masas con diferentes valores de FCC y del índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), utilizado como indicador preliminar del vigor de las masas forestales. No se incluyeron áreas con una FCC inferior al 30 % ni arbolado con alturas menores a seis metros. Además, se procuró que los puntos estuvieran distribuidos de manera homogénea en dos rangos de FCC, de 30-60 % y superiores al 60 %, dado que la identificación de daños en masas abiertas resulta más compleja por la interferencia de la señal del suelo.

Durante la inspección, se recopiló información precisa de las parcelas, incluyendo su identificación, coordenadas submétricas y radio, ajustado según la extensión del daño observado. Asimismo, se caracterizó la masa forestal en función de la estructura, la clase de edad, la altura media del arbolado, la presencia de sotobosque y el nivel de FCC, tanto del dosel principal como del sotobosque. En cuanto a los daños, se registró el porcentaje de árboles afectados, el nivel de defoliación o decoloración observado y su distribución (ya sea dispersa o agrupada), además de las posibles causas, como sequía, plagas, hongos o muérdago.

En total, se evaluaron 72 parcelas con características diversas. La Figura 2 ilustra un área en el municipio de Jarafuel, Valencia, donde los técnicos de la Comunidad Valenciana habían informado sobre un decaimiento atribuido a la sequía. Se evaluaron cinco parcelas durante la campaña, siendo las marcadas en rojo aquellas clasificadas con los daños más graves. Además, se incluye la ortofoto de 2021 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), así como una fotografía tomada en campo de la parcela ubicada más al norte.

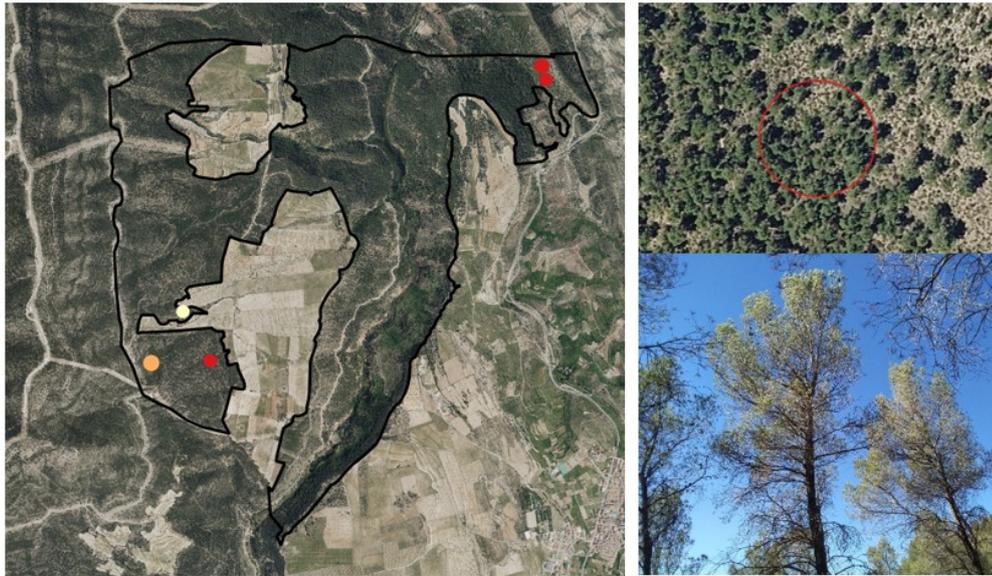


Figura 2. Ejemplo del muestreo llevado a cabo en la zona de Jarafuel, Comunidad Valenciana (izq), ejemplo de una de las parcelas evaluadas (arriba-derecha) y fotografía de alguno de los árboles dentro de esa misma parcela (abajo-derecha)

3. Procesado de la serie histórica de imágenes Landsat

Para llevar a cabo el análisis, se emplearon imágenes multiespectrales con resolución espacial de 30 metros capturadas por la constelación Landsat (sensores ETM+, Landsat 7; OLI y TIRS, Landsat 8 y 9), con periodicidad de adquisición de 16 días, y con formatos de entrega ortorrectificados y georreferenciados. Las imágenes fueron corregidas geométrica y atmosféricamente, mostrando valores de reflectividad superficial. Inicialmente, la selección se restringió a escenas capturadas entre los meses de junio y septiembre de cada año de la serie histórica analizada (2002-2024), para hacerlas coincidir con las campañas de campo de las Redes de seguimiento nacional y autonómicas destinadas a la identificación de daños en el arbolado.

Sin embargo, la severa sequía que afectó a la Península Ibérica en el periodo entre 2022 y 2024 puso de manifiesto que el periodo junio-septiembre no era un periodo óptimo para una detección temprana de estos procesos. Los expertos en plagas de la Comunidad Valenciana informaron que un gran número de masas de pino carrasco comenzaron a amarillear a principios de febrero de 2024. Tras el invierno, cuando el arbolado normalmente emerge de su estado de reposo vegetativo, inicia el movimiento de savia y la brotación. No obstante, el debilitamiento causado por la sequía y la falta de recurso hídrico en el suelo, impidieron este proceso en muchos árboles, que empezaron a mostrar signos de estrés en forma de amarillamiento (Figura 2). Por esta razón, se decidió reprocesar la serie histórica de imágenes Landsat (2002-2024), enfocándose en el periodo comprendido entre el 15 de abril y el 15 de junio.

Para garantizar la calidad de los datos, se enmascararon los píxeles clasificados como nubes, neblina, sombras y nieve, utilizando la banda QA_PIXEL disponible en las escenas Landsat. Finalmente, los compuestos se generaron aplicando la técnica

de la mediana, lo que permitió obtener imágenes representativas y libres de anomalías.



Figura 3. Ejemplo de una masa de pino carrasco comenzando a amarillear a principios de febrero de 2024 en la Comunidad Valenciana.

Una vez generada la serie temporal de compuestos anuales se derivó para cada uno de ellos el índice *Normalized Burn Ratio* (NBR; KEELEY 2009). Si bien este índice se utiliza comúnmente para evaluar la severidad de los incendios forestales, en nuestro estudio desempeñó un doble papel. Al comparar las bandas del NIR (infrarrojo cercano) y del SWIR (infrarrojo de onda corta) nos permite evaluar el estrés hídrico, al tiempo que nos permite discriminar los cambios bruscos, que no son objeto de este estudio. Cuando la vegetación no está sometida al estrés hídrico, el NBR tiende a tener valores más altos, ya que hay una cantidad significativa de biomasa verde, lo que resulta en una alta reflectancia en la región del NIR y una baja reflectancia en la región del SWIR, lo que produce un NBR positivo. En cuanto a la detección de cambios bruscos, son varias las investigaciones que han utilizado este índice para detectar, no sólo la ocurrencia de incendios forestales, sino también la detección de cortas (LI et al. (2021), COHEN et al. (2018)). El propósito era demostrar que, si podíamos identificar el estrés hídrico mientras filtrábamos los cambios abruptos, seríamos capaces de detectar las masas forestales más afectadas por la sequía y por tanto más vulnerables a empezar a sufrir eventos de mortalidad generalmente agravada por ataques de agentes bióticos.

3.

a. Implementación del algoritmo de detección de cambios sutiles

Inicialmente, se ensayó con el algoritmo LandTrendr (*Landsat-based detection of trends in disturbance and recovery*), desarrollado por KENNEDY et al. (2010), para identificar cambios sutiles en las masas de pino carrasco, debido a su capacidad de segmentación espectro-temporal para detectar magnitud, duración y momento de las perturbaciones a partir de trayectorias de índices espectrales como el NBR. LandTrendr ha demostrado ser eficaz detectando cambios bruscos (ARDIARISTO et al., 2024), sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con para detectar cambios sutiles con datos de campo recopilados en septiembre de 2023 por Agresta y con información de Cataluña, Aragón y la Comunidad Valenciana, se evidenció que el algoritmo no logra detectar cambios graduales relacionados con el decaimiento forestal, lo que llevó a explorar metodologías alternativas basadas en compuestos anuales de imágenes de primavera. La Figura 4 muestra cómo los procesos de decaimiento forestal, inducidos por factores como sequías, calor extremo o plagas, presentan una evolución gradual, en contraste con perturbaciones abruptas como incendios o cortas, caracterizadas por pérdidas rápidas de vegetación (COOPS et al., 2020).

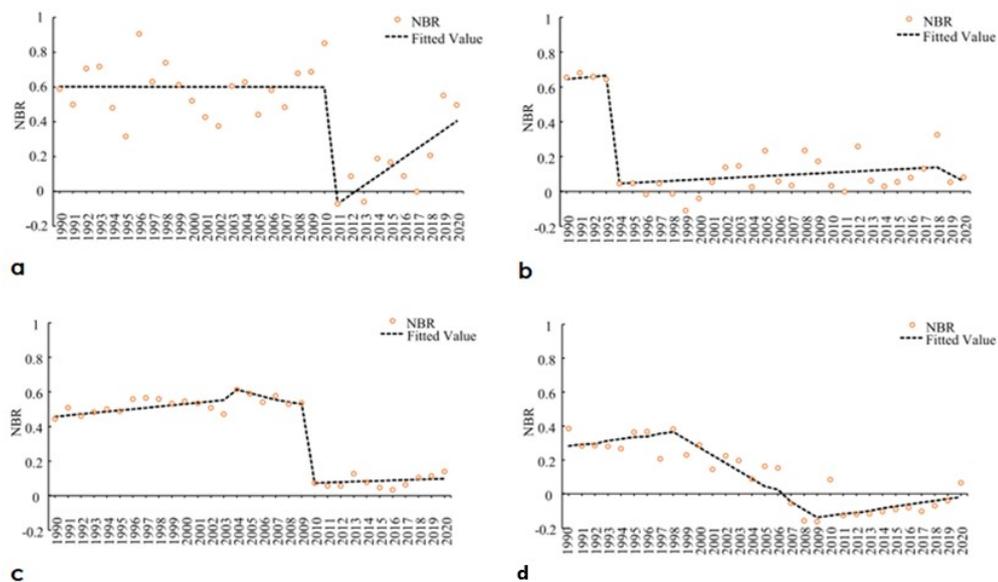


Figura 4. Trayectorias típicas de segmentos temporales en LandTrendr (línea discontinua gris) asociados a diferentes perturbaciones: a) incendio forestal, b) cortas, c) construcción de carreteras, d) ataque de insectos. Fuente: Li et al. (2021).

No obstante, al comparar los resultados obtenidos con LandTrendr con los datos de campo recopilados durante la campaña de septiembre de 2023 por Agresta y con información proporcionada por Cataluña, Aragón y la Comunidad Valenciana, se concluyó que el algoritmo no era capaz de detectar los cambios graduales que relacionamos con el decaimiento forestal. Esta limitación llevó a explorar una metodología alternativa basada en los compuestos anuales de imágenes de primavera.

La nueva metodología (Figura 5) basada en un ajuste lineal de tendencias móvil, permitió derivar dos productos a partir de las series temporales del índice NBR. Por un lado, se obtuvo la pendiente resultante del ajuste lineal móvil para cada píxel y año, considerando los valores del índice espectral de ese año y de los dos años anteriores. Por otro lado, se obtuvo el porcentaje de desviación del NBR por píxel y año respecto al valor de la mediana de los últimos 20 años.

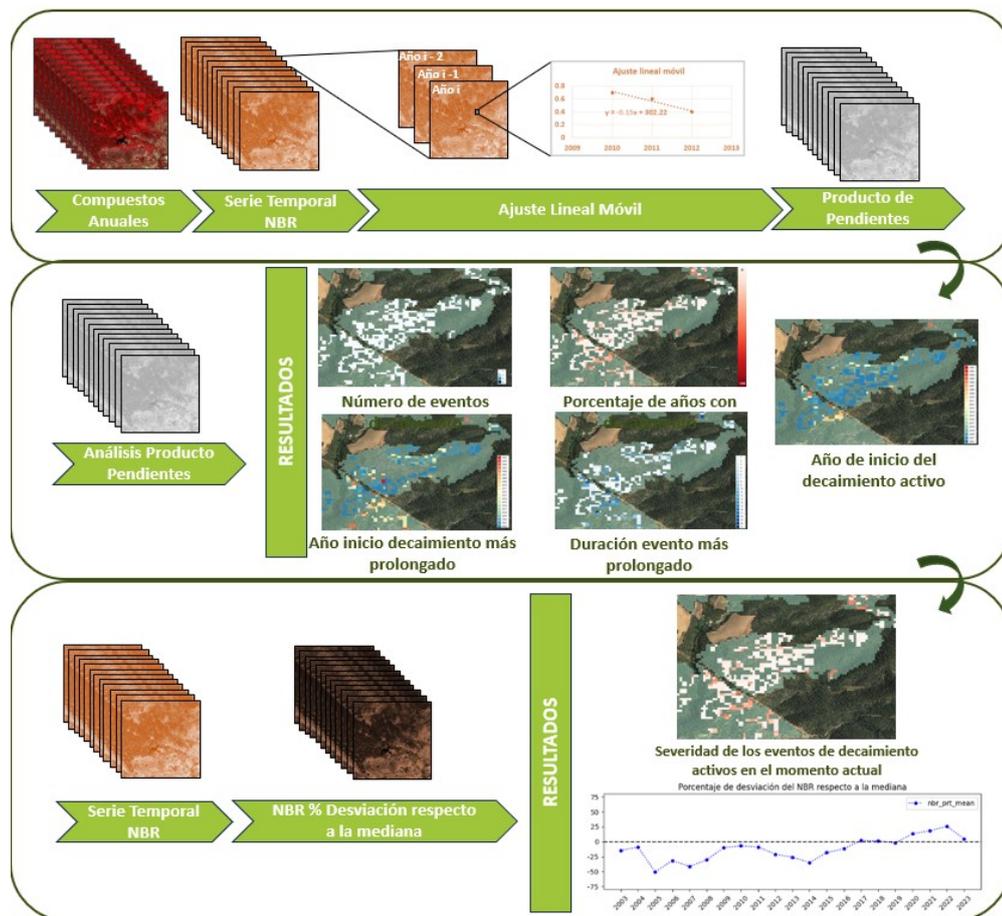


Figura 5. Esquema metodológico utilizado para la detección y caracterización del decaimiento en pinares de *Pinus halepensis*

En esta metodología, el producto de las pendientes se refinó aplicando un umbral específico para eliminar pendientes negativas de elevada magnitud asociadas a cambios abruptos, como incendios forestales o cortas. La determinación de este umbral se basó en un análisis estadístico a nivel de área, que comparó los perímetros de incendios registrados sobre masas de pino carrasco con los valores de pendiente observados después de que el incendio se hubiera producido y fuera visible en las imágenes.

El proceso incluyó el cálculo del promedio de pendientes en cada incendio forestal registrado por el sistema EFFIS del servicio Copernicus de la ESA, estableciendo el umbral como el percentil 75 de estos promedios en todas las áreas

analizadas. Posteriormente, se consideraron las pendientes negativas con magnitud superior a la del umbral obtenido como indicadoras de cambios bruscos. Estas pendientes fueron enmascaradas en los análisis año tras año hasta que el píxel afectado mostró una recuperación en su pendiente, indicando el inicio de la regeneración de la masa forestal.

La severidad de los eventos de decaimiento sutil se determinó como el porcentaje de desviación del índice NBR por píxel y año en relación con la mediana de los últimos 20 años ($desvNBR$), considerando exclusivamente aquellos eventos aún activos en 2024. Para cada píxel, se calculó este porcentaje de desviación y se clasificó en una de las cuatro categorías predefinidas según su valor.

Los rangos de severidad se definieron tras analizar el histograma de los datos, que mostró una concentración de valores entre -25% y 25%. Basándose en esta distribución y tras una revisión visual, las clases de severidad se establecieron de la siguiente forma:

- Clase 4 (Severidad grave): Desviación porcentual < -20
- Clase 3 (Severidad media-alta): $-20 \leq$ Desviación porcentual < -10
- Clase 2 (Severidad media-baja): $-10 \leq$ Desviación porcentual < 0
- Clase 1 (Severidad nula-baja): Desviación porcentual ≥ 0

3.

a. **Evaluación de la precisión del algoritmo frente a datos de campo**

Para validar los resultados obtenidos, se comparó la cartografía de severidad de los eventos de decaimiento activos en 2023 con los datos de campo recolectados por Agresta durante la campaña de septiembre del mismo año. Para cada una de las 72 parcelas evaluadas, se realizó un análisis estadístico por zona, asignando a cada parcela un valor de severidad basado en el promedio de severidad obtenido a partir del mapa. La asignación final se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de la severidad media en las parcelas de campo según el mapa resultante

Rangos de severidad media en la parcela	Severidad asignada
$4 \leq x < 3$	Grave
$3 \leq x < 2$	Media - alta
$2 \leq x < 1$	Media - baja
$1 \leq x < 0$	Nula - baja



Para la validación, utilizó una matriz de confusión, a partir de la cual se calcularon diversos estadísticos: precisión global, errores de comisión y omisión por clase. La matriz de confusión se calculó utilizando el método de expansión de la diagonal, dado que las clases de severidad son difíciles de delimitar con exactitud en el trabajo de campo.

Considerando el tamaño limitado del conjunto de validación en algunas clases y el desequilibrio en la distribución de muestras, se calcularon intervalos de confianza del 95% para la precisión por clase. Para ello se empleó el método de Wald ajustado (Agresti and Coull, 1998), con el objetivo de ofrecer una estimación más robusta de la incertidumbre asociada a los valores observados. Estos intervalos se calcularon sobre la matriz de confusión no expandida.

4. Resultados

a. Filtrado de cambios bruscos

La metodología utilizada demostró una gran sensibilidad en la detección de cambios bruscos (perturbaciones rápidas y severas como incendios forestales) y su filtrado, pues estos no eran objeto del presente trabajo. La Figura 6 muestra el producto de pendientes correspondiente al año 2023 en la zona circundante al perímetro del incendio de Vall d'Ebo, en Alicante. En color morado se representan los píxeles enmascarados debido a que sus valores de pendiente estaban por debajo del umbral, lo que indica un cambio abrupto, en este caso, un incendio forestal. En rojo se destaca el perímetro del incendio registrado por el sistema EFFIS, corroborando la relación entre los píxeles enmascarados y el evento de incendio. Estos píxeles no se incluyeron en el análisis de identificación de eventos de decaimiento, ya que representan un cambio drástico.

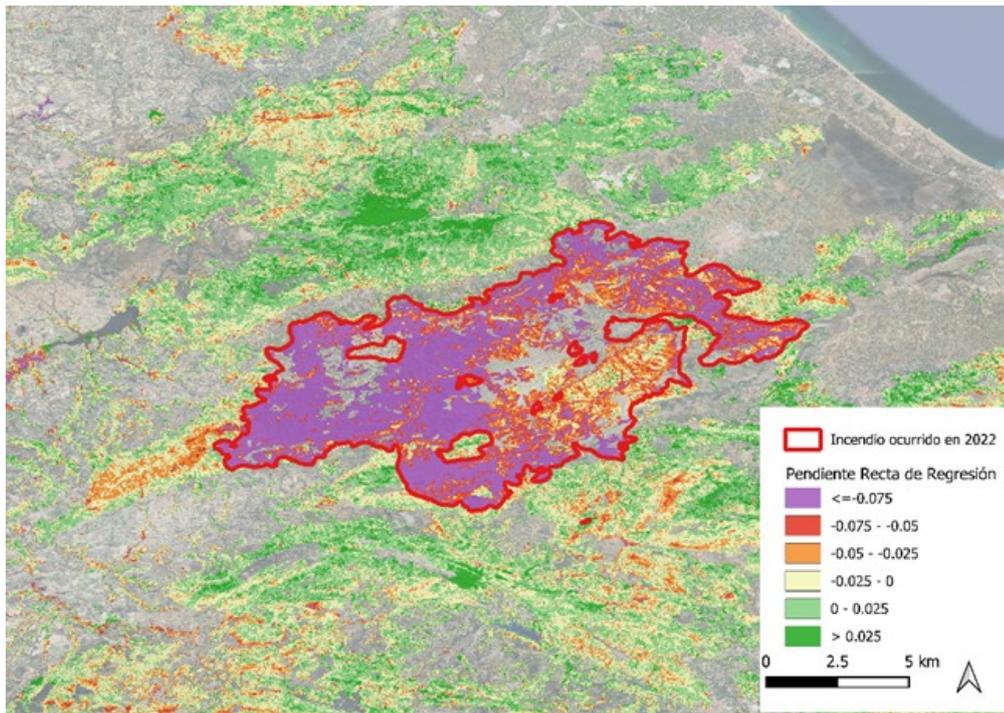


Figura 6. Ejemplo del producto de pendientes en el entorno de la zona afectada por el incendio de Vall d'Ebo, en Alicante, ocurrido en 2022.

4.

a. **Análisis del decaimiento a lo largo de la serie histórica**

Aplicada sobre la serie histórica de imágenes Landsat (2005-2024), la metodología aplicada en este trabajo ha permitido extraer una serie de productos cartográficos a partir del resultado de pendientes (ajuste lineal móvil en intervalos de 3 años), identificando las pendientes negativas mantenidas durante al menos 2 periodos como indicadores de la desvitalización o decaimiento de la cubierta forestal. Estos productos incluyen: el número de eventos de decaimiento detectados a lo largo de los últimos 20 años; el porcentaje de años que un pixel ha estado afectado por un evento de decaimiento, el año en el que se ha detectado el inicio del evento de decaimiento más largo del periodo, la duración del evento de decaimiento más largo del periodo, o el año de inicio del último evento de decaimiento sutil aún activo en 2024. Estos productos se han puesto a disposición de cualquier agente interesado en el monitoreo del vigor de los pinares de *Pinus halepensis* en la Península Ibérica y Baleares, a través del portal web <https://lifeadaptaleppo.agrestaweb.org/>.

El cálculo y mapeo de la severidad del decaimiento a lo largo de la serie histórica mediante la metodología propuesta permitió caracterizar toda la superficie analizada en relación a la evolución histórica del vigor del arbolado. La Figura 7 muestra la serie temporal de este indicador para una muestra del área de estudio.

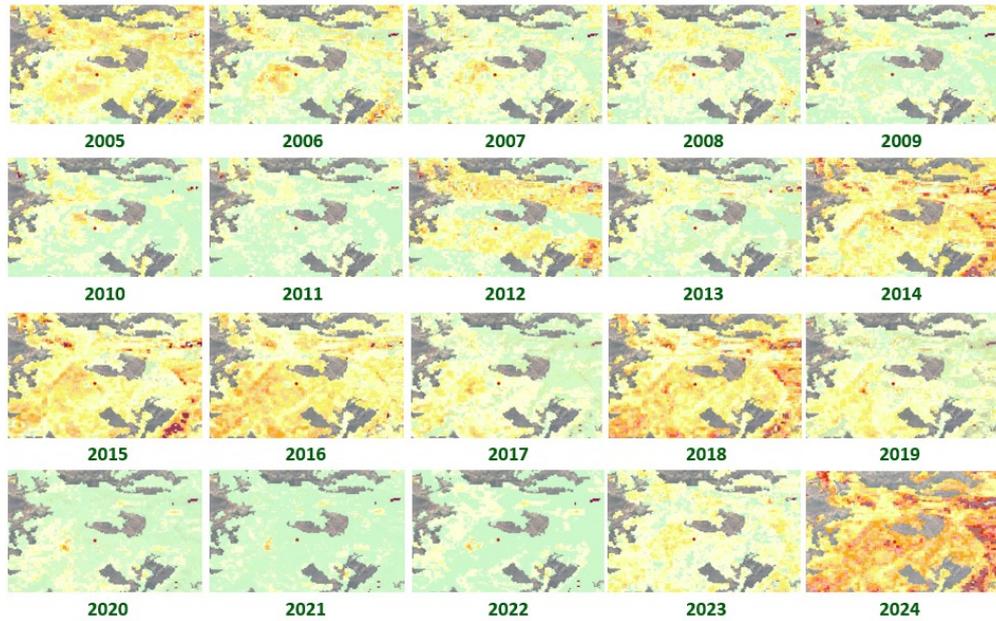


Figura 7. Serie temporal del producto “Porcentaje de desviación del NBR por píxel y año con respecto a la mediana de los últimos 20 años”. Coordenadas del centro de la zona muestreada: -0.32597, 39.81566, -0.32597 (WGS84 en grados decimales).

4.

a. Exactitud de los resultados

La precisión global del diagnóstico en el conjunto de parcelas visitadas en campo, considerando todas las casuísticas visitadas (siempre masas de pino carrasco con FCC superior al 30%), fue de 0.75 (Tabla 2). Se observan errores elevados de comisión y omisión en la clase de severidad grave, y también existen errores de comisión altos en la clase de severidad nula-leve. La clase de severidad media-baja presenta un error de omisión significativo.

Tabla 2. Matriz de confusión en el conjunto de parcelas de validación (masas con FCC > 30%)

		Observado				Total	Precisión usuario	Error de comisión
		GRAVE	MEDIA ALTA	MEDIA BAJA	NULA LEVE			
Mapa	GRAVE	5	9	7	2	23	0.61	0.39
	MEDIA ALTA	2	10	2	1	15	0.93	0.07
	MEDIA BAJA	0	6	8	1	15	1	0
	NULA LEVE	6	2	3	8	19	0.58	0.42
Total		13	27	20	12	72		
Precisión productor		0.54	0.93	0.65	0.75			
Error de omisión		0.46	0.07	0.35	0.25			
Precisión Global						0.75		



Dado que se observó que la identificación del decaimiento resultaba más compleja en masas forestales más abiertas, debido a la interferencia espectral del suelo y de la vegetación arbustiva, se realizó un segundo análisis focalizado en parcelas con una FCC superior al 60% (Tabla 3). En este caso, se observó una mejora en la identificación del decaimiento, alcanzando una precisión global de 0.85. Esta también fue calculada mediante el método de expansión de la diagonal. La precisión global de la clasificación aumentó y se redujeron los errores de comisión y omisión, aunque el error de comisión en la clase de severidad grave y el error de omisión en la clase de severidad media-baja se mantuvieron elevados.

Tabla 3. Matriz de confusión en masas con FCC > 60%

		Observado						
		GRAVE	MEDIA ALTA	MEDIA BAJA	NULA LEVE	Total	Precisión usuario	Error de comisión
Mapa	GRAVE	3	5	4	0	12	0.67	0.33
	MEDIA ALTA	1	8	2	1	12	0.92	0.08
	MEDIA BAJA	0	6	6	0	12	1	0
	NULA LEVE	1	1	2	4	8	0.75	0.25
Total		5	20	14	5	44		
Precisión productor		0.8	0.95	0.71	0.8			
Error de omisión		0.2	0.05	0.29	0.2			
Precisión						0.84		

En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados de precisión por clase con intervalos de confianza (95%) según el método de Agresti-Coull para masas con FCC > 30% y FCC > 60%, calculadas sobre la matriz de confusión no expandida.

Tabla 4. Precisión por clase con intervalos de confianza (95%) según el método de Agresti-Coull para masas con FCC > 30%.

Clase	IC inferior	IC superior
GRAVE	0.092	0.423
MEDIA ALTA	0.415	0.85
MEDIA BAJA	0.301	0.752
NULA LEVE	0.231	0.638

Tabla 5. Precisión por clase con intervalos de confianza (95%) según el método de Agresti-Coull para masas con FCC > 60%.

Clase	IC inferior	IC superior
GRAVE	0.388	0.864
MEDIA ALTA	0.625	1
MEDIA BAJA	0.718	1
NULA LEVE	0.401	0.937

4.

a. **Análisis del decaimiento de las masas en 2024**

Ante la severa sequía que afectó a la Península Ibérica en 2023 y las alertas emitidas por los agentes de campo de distintas comunidades autónomas, quienes reportaron que extensas masas de pino carrasco (*Pinus halepensis*) comenzaron a mostrar signos de amarillamiento a principios de febrero de 2024, se decidió realizar un análisis adicional de la severidad del decaimiento en 2024 en toda el área de distribución de esta especie (masas dominadas por pino carrasco con FCC > 30%). Este análisis permitió evaluar el porcentaje de superficie de pino carrasco afectada por diferentes grados de severidad en el decaimiento, proporcionando una visión más detallada del impacto en estos ecosistemas forestales (Figura 10, Tabla 2).

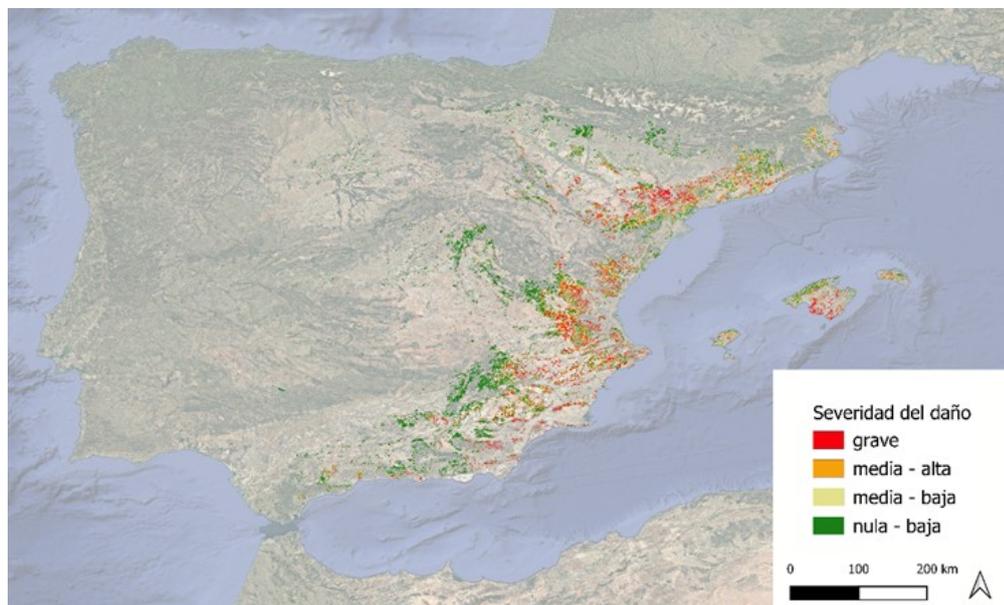


Figura 8. Cartografía de severidad del decaimiento en 2024 clasificada por niveles: verde (nula o baja), amarillo (media-baja), naranja (media-alta) y rojo (grave).

Tabla 6. Porcentaje de superficie de pino carrasco afectada por diferentes grados de severidad en el decaimiento

Nivel de severidad	% Superficie
baja o nula	51.2
media-baja	17.9
media-alta	12.6
grave	18.2

5. Discusión

La mayor parte de los algoritmos de series temporales para detección de cambios tienen problemas para la detección de cambios sutiles (GONG & XU, 2003). Tal como hemos comprobado, LandTrendr, método diseñado para detectar, caracterizar y mapear cambios graduales o abruptos en vegetación (KENEDY, et al 2010) no parece ser suficientemente sensible para la detección de cambios tan sutiles como el decaimiento por sequía en masas de pino carrasco. Otros estudios anteriores ya detectaron la necesidad de desarrollar algoritmos más sensibles, como es el caso de COOPS y sus colaboradores (2020), que fueron capaces de monitorizar perturbaciones de baja severidad y larga persistencia relacionadas con eventos de sequía mediante el algoritmo Composite2Change (C2C, HERMOSILLA et al, 2016) trabajando a gran escala en Canadá.

Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian que el análisis de series temporales del índice NBR, en combinación con metodologías específicas para filtrar cambios abruptos, permite identificar con precisión procesos de decaimiento sutil en masas de pino carrasco. La comparación de los mapas resultantes con datos de campo demuestra una precisión global aceptable, aunque persisten desafíos en la clasificación de niveles de severidad, especialmente en masas abiertas (con FCC menor del 60 %).

Otros estudios habían demostrado previamente la idoneidad del índice NBR para este propósito, por ejemplo, LI et al. (2021) analizaron con el algoritmo LandTrendr las perturbaciones forestales a partir de series temporales de imágenes Landsat en una región al suroeste de China. Las variables resultantes del algoritmo LandTrendr, junto a otras, se introdujeron como variables predictoras en un modelo Random Forest (RF), del que las variables predictoras con mayor importancia relativa en la clasificación de los agentes perturbadores fueron las derivadas del índice TCW (*Tasselled Cap Wetness*) y del NBR. Por su parte, COHEN et al. (2018) también ensayaron la detección de perturbaciones combinando los resultados obtenidos por LandTrendr con una clasificación posterior utilizando un modelo RF. El algoritmo LandTrendr lo ejecutaron con varias combinaciones de las bandas básicas de reflectividad de Landsat y siete índices espectrales comunes. Los resultados mostraron que los índices más prometedores para la detección de perturbaciones eran el NBR, el NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*) y el TCW.



Por otro lado, la aplicación del algoritmo de evaluación de la severidad a 2024 muestra un impacto significativo del decaimiento, con más del 30 % de la superficie de pino carrasco clasificada en niveles de severidad media-alta o grave. Este patrón es consistente con las condiciones de sequía extrema registradas en el periodo 2021-2023 (GARRIDO-PEREZ et al, 2024) y las observaciones de campo realizadas a principios de 2024. La capacidad de generar mapas precisos y actualizados subraya el potencial de esta herramienta para apoyar decisiones de gestión adaptativa en tiempo real.

La metodología aplicada destaca por su capacidad de identificar áreas afectadas por estrés hídrico, principal desencadenante del decaimiento forestal (SÁNCHEZ-SALGUERO, et al 2010), así como por su flexibilidad para discriminar los cambios más bruscos de los cambios más graduales asociados a agentes bióticos como escolítidos y hongos, los cuales a menudo se entremezclan con la pérdida de vigor del arbolado derivada del estrés hídrico. Sin embargo, los errores de clasificación observados, especialmente en áreas con FCC inferior al 60 %, subrayan la necesidad de ajustes metodológicos. Estos ajustes podrían enfocarse en aspectos como el testeado o la combinación de índices espectrales para el ajuste de modelos predictivos, o la adquisición y uso de imágenes de mayor resolución espacial, aunque hoy en día todavía no es posible analizar series temporales prolongadas con ese tipo de imágenes. Otro aspecto fundamental es la disponibilidad de datos de campo válidos para su análisis contra datos de teledetección. Durante este trabajo hemos constatado que las bases de datos nacionales y regionales exploradas (red Europea/Nacional de Daños en los Bosques, redes regionales de Aragón, Cataluña, Comunidad Valenciana, Andalucía, etc.) 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, consideramos que deberían replantearse 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 control próximas (en distancia y características) a las áreas afectadas.

Una línea de trabajo futura para la generación de alertas tempranas consistirá en un análisis comparativo de las pendientes año a año que, en lugar de centrarse únicamente en las pendientes negativas, identifique prealertas cuando se detecte una disminución en la pendiente de la regresión lineal entre un año y el siguiente, sin necesidad de que esta sea negativa. Este enfoque permitirá detectar de manera más temprana las tendencias de pérdida de vigor, mejorando la efectividad de la herramienta en el seguimiento de las masas forestales, aunque será imprescindible desarrollar un método para minimizar la incidencia de falsos positivos y garantizar la fiabilidad de las alertas.

6. Conclusiones



El estudio confirma la utilidad de los índices espectrales derivados de series temporales de imágenes Landsat para detectar y monitorear procesos de decaimiento sutil en bosques de pino carrasco, especialmente en contextos de estrés hídrico severo como es el caso de la primavera de 2024 (tras la grave sequía de 2022/23), momento en el que más del 30 % de la superficie de pino carrasco quedaba clasificada en niveles de severidad media-alta o grave.

Los resultados obtenidos destacan la relevancia de herramientas de teledetección para identificar las masas más vulnerables al ataque de agentes bióticos, lo que posibilita la adopción de medidas preventivas dirigidas. La precisión mejorada en masas con FCC superior al 60 % refuerza la importancia de incluir parámetros estructurales en los análisis de decaimiento. Sin embargo, sigue siendo necesario mejorar la metodología para identificar los cambios sutiles en masas con menor FCC ya que la señal captada por el satélite suele estar contaminada por estratos inferiores.

Finalmente, la metodología propuesta y los productos generados ofrecen un enfoque práctico para integrar el monitoreo remoto en la gestión forestal. Esto representa un paso importante hacia la mitigación de los efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales mediterráneos, mejorando la resiliencia de las masas de pino carrasco frente a futuros desafíos climáticos y bióticos.

7. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento por su apoyo técnico y científico a la Dirección General de Medi Natural i Animal de la Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Infraestructures i Territori (Generalitat Valenciana), al Laboratori de Sanitat Forestal del CIEF, gestionado por VAERSA, bajo la misma Conselleria, al Servei de Gestió Forestal de la Direcció General d'Ecosistemes Forestals i Gestió del Medi, del Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural (Generalitat de Catalunya), y al Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón.

El Proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (*Adaptive management of Mediterranean Pinus halepensis forests in the face of climate change*) con código LIFE20 CCA/ES/001809 ha recibido financiación del programa LIFE de la Unión Europea.

8. Bibliografía

- ARDIARISTO, A., PRASETYO, L.B., SYAUFINA, L. Y KOSMARYANDI, N., 2024. Monitoring vegetation changes and disturbances in gunung merbabu national park using LandTrendr algorithm and landsat images. *Ecol. eng. environ. technol.* 25, 298–307.
- COHEN, W. B., SPIES, T. A., Y FIORELLA, M. 1998. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 993-1021.
- COOPS, N., CHEN, S., WULDER, M.A., WHITE, J.C. Y HERMOSILLA, T. 2020. Change in forest condition: Characterizing non-stand replacing disturbances using time



- series satellite imagery, *Forest Ecology and Management*, Volume 474, 118370.
- COHEN W.B., YANG Z., HEALEY SP., KENNEDY RE., GORELICK N. 2018. A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection. *Remote Sens. Environ.* 205: 131–140.
- CRAMER, W., GUIOT, J., MARINI, K., SECRETARIAT Y M., BLEU, P. 2020. Climate and environmental change in the Mediterranean basin—current situation and risks for the future. First Mediterr. Assess. Report. MedECC (Mediterranean Expert. Clim. Environ. Chang. Union Mediterr. Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, Fr.
- DE JONG SM, SHEN Y, DE VRIES J., BIJNAAR, G., BAREND VAN MAANEN, P. Y AUGUSTINUS, P.V, 2021. Mapping mangrove dynamics and colonization patterns at the Suriname coast using historic satellite data and the LandTrendr algorithm. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 97: 102293.
- GARRIDO-PEREZ, J. M., VICENTE-SERRANO, S. M., BARRIOPEDRO, D., GARCÍA-HERRERA, R., TRIGO, R., Y BEGUERÍA, S. 2024. Examining the outstanding Euro-Mediterranean drought of 2021–2022 and its historical context. *Journal of Hydrology*, 630, 130653.
- GONG, P., XU, B., 2003. Remote Sensing of Forests Over Time. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (Eds.), *Remote Sensing of Forest Environments*. Springer, Boston, MA, USA, pp. 301–333.
- GUILLEN-CLIMENT, M.L., MAS, H., FERNÁNDEZ-LANDA, A., ALGEET-ABARQUERO, N., TOMÉ J.L. 2020. Using hipersepctral images for decay detection in *Pinus halepensis* (Mill.) in the Mediterranean forest. *Revista de Teledetección*, 55, 59-69.
- HERMOSILLA, T., WULDER, M.A., WHITE, J.C., COOPS, N.C., HOBART, G.W., CAMPBELL, L.B., 2016. Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring. *International Journal of Digital Earth*, 9(11), 1035-1054.
- HUANG, C., GOWARD, S. N., MASEK, J. G., THOMAS, N., ZHU, Z., Y VOGELMANN, J. E. 2020. An approach for characterizing forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 1-16.
- KEELEY, J. E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126.
- KENNEDY R.E., YANG Z., COHEN W.B. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* 114: 2897 – 2910.
- Li, Y., Wu, Z., Xu, X., Fan, H., Tong, X., Liu, J., 2021. Forest disturbances and the attribution derived from yearly Landsat time series over 1990–2020 in the Hengduan Mountains Region of Southwest China. *For. Ecosyst.* 8, 73.
- SÁNCHEZ-SALGUERO, R., NAVARRO, R. M., CAMARERO, J. J., & FERNÁNDEZ-CANCIO, ÁNGEL. 2010. Decaimiento del crecimiento inducido por sequía en bosques de pino carrasco y pino negral del sudeste de España. *Forest Systems*, 19(3), 458-470.
- SENF, C., PFLUGMACHER, D., ZHIQIANG, Y., Y HOSTERT, P. (2021). Mapping forest disturbance across large areas using Landsat: A review and comparison of existing approaches. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112584.
- VOGELMANN, J. E., TOLK, B., Y ZHU, Z. 2012. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 39-50.