



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1846

Organiza





Relación entre índices de estrés hídrico procedentes de sensores remotos y la aptitud para el descorche en alcornoques de Cataluña

MARTÍN ALCÓN, S. (1), LLAURADÓ VILÀ, X. (2), ESTEBAN CAVA, J. (1) y AMEZTEGUI, A. (3,4)

1. Agresta S. Coop.
2. Amorim Florestal Mediterráneo, S.L.
3. Universitat de Lleida. Departamento de Ciencia e Ingeniería Forestal y Agrícola. Adaptive Management and Forest Dynamics Research Group (ADAPTAFOR)
4. Unidad Conjunta de Investigación CTFC – AGROTECNIO – CERCA

Resumen

El uso de imágenes de satélite presenta un gran potencial para realizar un seguimiento del estado hídrico de los alcornoques, ya que permite monitorizar series temporales de alta resolución temporal (pocos días) con un coste relativamente bajo. Este seguimiento resulta imprescindible para una adecuada planificación a corto plazo de los trabajos de extracción del corcho (pela), ya que esta se ve fuertemente condicionada por el estado hídrico del alcornoque. Trabajos previos han identificado algunos índices con capacidad explicativa del estado hídrico del alcornocal, pero aún no se conoce con exactitud la verdadera relación entre estos índices de estrés hídrico procedentes de sensores con la posibilidad de descorche o aptitud para el descorche. Presentamos aquí los resultados de un proyecto (GOSuro) en el que se han combinado datos de campo sobre la viabilidad de extracción del corcho durante la campaña de 2024 en Cataluña, con una serie de indicadores de estado hídrico de la vegetación obtenidos a partir de teledetección, para tratar de predecir el papel del estado hídrico de los alcornoques en la operatividad de la extracción del corcho. En particular, el índice *Normalised Multi-band Drought Index* (NMDI) destacó como el mejor predictor del éxito en la pela, mostrando una relación positiva con el porcentaje de árboles pelados sin daños aparentes. Además, los resultados indicaron que la orientación de las parcelas (solana versus umbría) también influye en la capacidad predictiva de los índices, subrayando la importancia de las condiciones microclimáticas en la aptitud para el descorche. Esta metodología presenta un gran potencial para la mejora de la gestión sostenible de los alcornoques y la optimización de los procesos de extracción del corcho, evitando daños sobre el arbolado o sobrecostes derivados de una mala aptitud para el descorche.

Palabras clave

Quercus suber, corcho, Sentinel-2, teledetección, monitoreo forestal.

1. Introducción

Los alcornoques (*Quercus suber*) ocupan unas 69.212 ha en Cataluña según el Mapa Forestal Español del año 2016, distribuidas fundamentalmente en las comarcas del Alt Empordà y La Selva, así como en los macizos de Les Gavarres y el Montnegre-Corredor. Si contabilizamos la superficie de todas las teselas del MFE que contienen alcornoque como especie acompañante, la extensión de terreno donde encontramos la especie aumenta hasta las 124.134 ha. Se trata de una especie termófila que crece en sustratos no calcáreos, suelos arenosos y ligeros que favorecen el drenaje, a pesar de que también puede desarrollarse en suelos descarbonatados; preferentemente sobre pizarras, granitos, gneis y cuarcitas. En



condiciones normales, la pluviometría anual en estas zonas oscila entre los 600 y los 900 mm, proporcionando las condiciones de humedad necesarias para su crecimiento.

Los alcornoques de Cataluña tienen una importancia económica capital en las comarcas en las que habita, debido fundamentalmente a la producción de corcho. La AECORCK (*Associació d'Empresaris Surers de Catalunya*) cifra en 475 millones de euros la facturación anual de la industria transformadora del corcho en Cataluña, el 95% del cual proviene de la elaboración de tapones de corcho para tapar botellas. La producción anual de tapones asciende a 1.000 millones de tapones para vino espumoso (40% del mercado mundial) y unos 200 millones de tapones para vino tranquilo (10% del mercado mundial). En la región existen alrededor de 30 fábricas que generan unos 500 puestos de trabajo directos entre personal técnico y operarios. El año 2023 el valor de las exportaciones llegó a los 79,4 millones de euros. La media de extracción anual de corcho en Cataluña desde que se tienen datos (1988 al 2022) es de 4.722 toneladas, con importantes fluctuaciones anuales, según datos del Observatorio Forestal de Cataluña.

En las últimas décadas, el aumento de la demanda de corcho por parte de la industria, junto con la falta de gestión de buena parte de la superficie de alcornoque ha aumentado la dependencia de exportaciones externas de regiones como Portugal, Francia, Extremadura o Andalucía. Además, los episodios de sequía agravados por los efectos del cambio climático están comenzando a influir en el proceso de descorche. Un ejemplo de este efecto sería la campaña del 2023, cuando a pesar del aumento de más del 30% en el precio del corcho respecto a la campaña anterior, la cantidad de corcho extraído en Cataluña descendió hasta las 1.800 toneladas, según las estimaciones del Institut Català del Suro. Esta última campaña estuvo marcada por el retraso y acortamiento del periodo de descorche y la dificultad para gestionar los equipos encargados de dicha tarea.

El descorche es el proceso mediante el cual se separa la capa suberosa que rodea el tronco del alcornoque. El correcto trabajo de extracción de este producto mantiene intacta la capa madre para que ésta sea capaz de regenerar el corcho posteriormente. El periodo de descorche depende de factores climáticos y fisiológicos, y coincide con la etapa de activación de la capa madre para el crecimiento de los anillos de corcho, que dura desde primavera hasta mitad/final de verano, siendo este periodo variable (PEREIRA, 2007). Una vez llegado el otoño y, sobre todo, en invierno, estos tejidos entran en una fase de reposo vegetativo en la cual no se puede extraer el corcho sin echar a perder la capa generatriz (ARONSON et al., 2009). La sequía tiene un impacto directo en los procesos de evapotranspiración de los árboles y, como tal, el descorche debe realizarse en condiciones de humedad adecuada para evitar daños al árbol. En condiciones de déficit hídrico, el corcho puede volverse más quebradizo, dificultando su extracción sin causar heridas en la capa viva del tronco (felógeno) (VAZ et al., 2011). Además, los alcornoques descorchados bajo situaciones de estrés hídrico tendrán menor capacidad para cicatrizar y regenerar corcho después del descorche, lo que puede alargar los ciclos de extracción (OLIVEIRA et al., 2016).

La teledetección mediante imágenes satélite permite monitorizar procesos como el estrés hídrico de la vegetación (VARGHESE et al., 2021). Los sensores de los satélites captan diferentes bandas espectrales, como las del visible, el infrarrojo próximo (NIR) y el infrarrojo térmico (SWIR) que son especialmente útiles para evaluar el estrés hídrico y la actividad vegetativa. El satélite Sentinel-2 forma parte



del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), y ofrece imágenes multispectrales con una resolución espacial de hasta 10 metros y una resolución temporal de 5 días, hecho que permite una monitorización continua y precisa de los cambios en la cobertura vegetal. Durante los últimos años se ha avanzado mucho en el uso de esta tecnología para el monitoreo del estrés hídrico de la vegetación forestal, sin embargo, no existen todavía casos de aplicación al monitoreo de alcornoques. En la Península Ibérica, Agresta S. Coop. desarrolló en 2018 una metodología para realizar el seguimiento del estado hídrico de los bosques de alcornoque de la Sierra de Espadán (Castelló), empleando varios índices como NDIIn, TGI, SAVIn y EVIn. A pesar de los resultados prometedores que este estudio presentó, en las consideraciones finales se admitía que la toma de datos de campo que contrastaran la información derivada de las imágenes era necesaria en futuros estudios. Este trabajo pretende cubrir precisamente este déficit, combinando información sobre el estado hídrico de los alcornoques con datos de campo que permitan determinar la efectividad del proceso de descorche.

2. Objetivos

El presente trabajo analiza la correlación entre los datos que nos ofrecen los índices de estrés hídrico calculados a partir de imágenes capturadas remotamente y la información recogida en campo durante la campaña de descorche del año 2024 en Cataluña. Más concretamente se pretende desarrollar una metodología basada en la teledetección para monitorizar el estrés hídrico de los alcornoques en tiempo real, y determinar la relación entre el estado hídrico de los alcornoques y la viabilidad de efectuar trabajos de descorche en condiciones de sequía.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El área de estudio abarca la totalidad del área productora de corcho de Cataluña, teniendo en cuenta los 4 grandes macizos que contienen estas formaciones:

- Las Alberes – Alt Empordà
- Macizo de las Gavarres – Baix Empordà y Gironès
- Montseny – La Selva
- Macizo del Montnegre-Corredor – Maresme

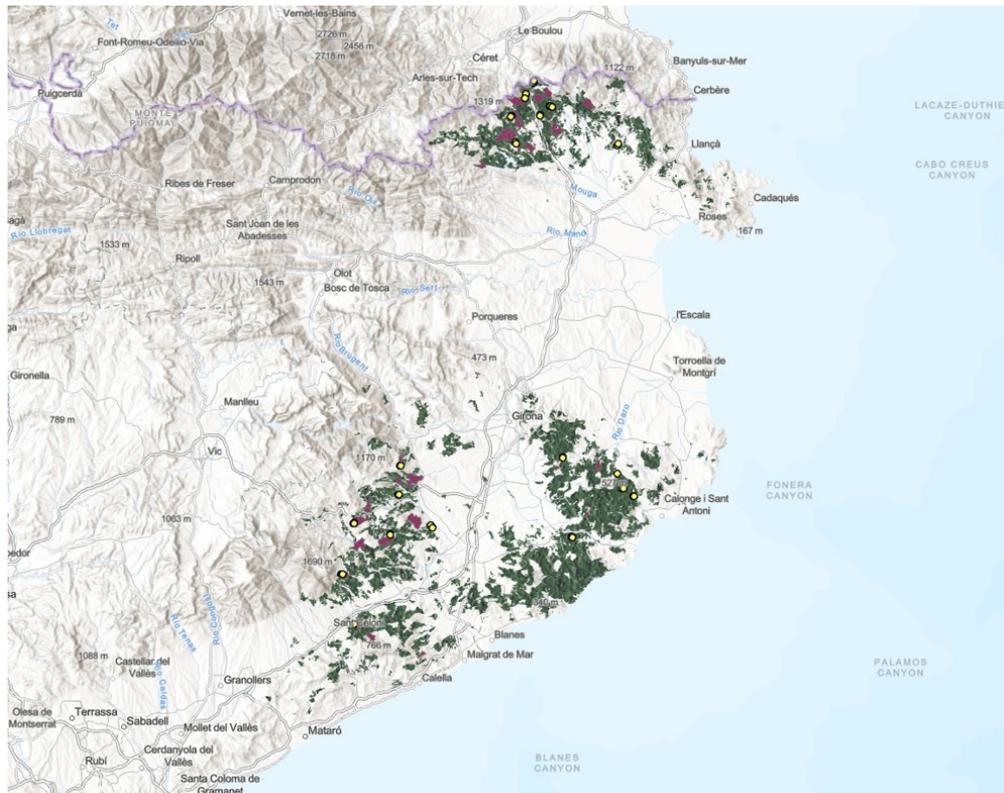


Figura 1. Localización de los alcornocales (verde oscuro), las fincas con perímetro conocido del área de descorche durante la temporada 2024 (morado) y los puntos de muestreo a campo (puntos amarillos)

Dentro de este ámbito, y debido a los objetivos del estudio, los perímetros de alcornocal objeto de inventario son aquellos que han sido descorchados durante la campaña 2024, según la información proporcionada por Amorim Florestal Mediterraneo, S.L., ya que es en estas zonas en las que se puede evaluar los efectos de los trabajos de descorche y su viabilidad, asociándolos a una fecha determinada para poder compararlos con los datos de estado hídrico.

3.2 Diseño del inventario de campo

El objetivo del inventario de campo era establecer un mínimo de 40 puntos de muestreo, en localizaciones con fecha de descorche conocida durante la campaña de 2024, en los cuales evaluar el estado hídrico que el alcornocal tenía en el momento del descorche a través del análisis de los daños observados, pies no descorchados y otros signos que manifiestan un estado subóptimo. El procedimiento seguido para la selección de puntos de muestreo buscó recoger la máxima variabilidad de situaciones que se pueden dar en el área de alcornocal de Cataluña. Teniendo en cuenta toda el área productora de corcho mencionada en el punto anterior, se seleccionaron previamente aquellos perímetros de áreas de descorche que cumplieran las siguientes características:

- Identificación de fincas con perímetro conocido del área de descorche durante la temporada 2024.
- Identificación de fincas con fecha de descorche conocido, y periodo de descorche inferior a dos semanas; para poder establecer de manera inequívoca la equivalencia entre los índices procedentes de teledetección y los datos recogidos a campo.
- Identificación de factores topográficos contrastados: umbría vs. solana.



En base a estos requisitos, se preseleccionaron un total de veintidós perímetros de fincas donde se pudo asignar la fecha en la cual se llevaron a cabo los trabajos de descorche, distribuidos por los cuatro núcleos geográficos productores de corcho en Cataluña, y asegurando una representación equilibrada de puntos en orientaciones contrastadas de umbría y solana.

El resultado de la distribución aleatoria estratificada de puntos de muestreo dio finalmente un total de 49 puntos de inventario. La información a recoger en cada punto era la siguiente:

- Ubicación de la parcela: las coordenadas del punto de muestreo con la mayor precisión posible (submétrica) para poder relacionar los datos con los índices calculados a partir de las imágenes de Sentinel-2.
- Variables dasocráticas: muestreo por estimación pericial de las principales características de la parcela muestreada: densidad total y densidad de alcornoque, área basimétrica (m^2/ha) y diámetro medio cuadrático.
- Resultados de la campaña de descorche: proporción de árboles descorchados, anotando si el descorche se había podido efectuar sin daños al árbol, si se empezó a quitar el corcho pero se tuvo que dejar —hecho que habitualmente indica cierto estado de estrés hídrico—, o si se procedió a quitar el corcho dejando el individuo herido. Igualmente, se anotó el número de árboles muertos presentes en la parcela, así como los árboles donde el corcho era todavía bornizo, de dimensiones no aptas para ser quitado, así como los árboles de otras especies diferentes al alcornoque.
- Afección del coleóptero *Coroebus undatus* (carcoma del corcho): análisis visual de la afectación por carcoma de cada uno de los árboles incluidos en la parcela, clasificándolos como: sin afección, afección leve, moderada o severa en función del número de galerías detectadas.



Figura 2: Fotografías de alcornoques con diferentes condiciones relativas al descorche. Corcho dejado (izquierda), corcho herido (centro) y corcho quitado (derecha).

Los trabajos de inventario se realizaron en los meses de agosto y septiembre de 2024, una vez finalizada la campaña de descorche.

3.3 Selección de índices para el seguimiento del estado hídrico

Se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de preseleccionar los índices de vegetación a priori más indicados para poder realizar el seguimiento del estado hídrico del alcornoque. En este trabajo de revisión, se seleccionaron los índices de vegetación que emplean aquellas 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. Este trabajo dio como resultado la preselección de los siguientes índices:

- PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*): este índice evalúa aspectos bioquímicos como el contenido de clorofila y pigmentos. Es especialmente útil para analizar el estado de salud de la vegetación y grado de senescencia (SOTO et al., 2020).



- NREDI (*Red-edge ratio Normalized Vegetation Index*): al ser un índice del borde del rojo es utilizado especialmente para la salud y crecimiento de la vegetación, por ser sensible a los cambios en el contenido de clorofila (GITELSON y MERZLYAK, 1994).
- IRECI (*Inverted Red-Edge Chlorophyll Index*): se trata de un índice que ha mostrado resultados muy satisfactorios para modelizar el contenido de clorofila y el área foliar (FRAMPTON et al., 2013) y la productividad (DUSSEUX et al., 2018).
- SAVI (*Soil-adjusted vegetation index*): se trata de un índice que mide la cantidad de clorofila (crecimiento o densidad de la parte verde de la vegetación), y no tiene nada que ver con la cantidad de humedad en la hoja, sino que, en términos de estrés hídrico, serviría más para monitorizar el estado fisiológico de la planta a causa de factores como el estrés hídrico (HUETE, 1988).
- DSWI (*Disease Water Stress Index*): se trata de un índice que ha demostrado ser capaz de detectar condiciones climáticas cambiantes, especialmente el impacto de la sequía en los ecosistemas forestales (BOCHENEK et al., 2018; CANDOTTI et al., 2022; MIGAS-MAZUR et al., 2021).
- NMDI (*Normalised Multi-band Drought Index*): se trata de un índice que ha demostrado mejorar la sensibilidad a la gravedad de la sequía (WANG et al., 2007) y es muy adecuado para estimar el contenido de agua tanto para el suelo como para la vegetación.

Una vez preseleccionados los índices de vegetación, se procedió a trabajar con la serie de imágenes Sentinel-2 en 2024 para, en primer lugar, extraer los datos espectrales puntuales para la red de puntos de inventario realizada, en todas las imágenes Sentinel-2 capturadas durante la campaña 2024. Una vez extraídos los datos espectrales, se procedió al cálculo de los índices preseleccionados para todas las imágenes capturadas, libres de nubes y otros defectos en cada punto de muestreo. Finalmente, conociendo la fecha de descorche de cada punto, se extrajo el valor de los índices en la imagen más próxima a dicha fecha en cada caso.

3.4 Análisis de datos

Se analizó a través de modelos lineales generalizados univariantes la relación entre los diversos índices espectrales calculados y el porcentaje de alcornoques en los que se pudo efectuar el descorche. Al tratarse la variable respuesta de una proporción, se utilizó una distribución de los errores de tipo binomial, introduciendo el número total de alcornoques en cada parcela como variable de control (peso).

Se utilizaron diversos indicadores de desempeño de los modelos para evaluar de manera global su ajuste y poder comparar los resultados de los 6 índices espectrales testados. En concreto se evaluó la significación de la variable explicativa, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el criterio de información de Akaike corregido (AICc) y el criterio de información bayesiano (BIC). Además, se calculó un índice de desempeño global (*performance score*) que tiene en cuenta de manera conjunta todos los indicadores mencionados.

Una vez definido el índice espectral con mayor peso explicativo en la capacidad de descorche, se añadieron otras variables que también pudieran explicar potencialmente dicha capacidad. Así, el mejor modelo de los evaluados en el paso anterior se comparó con modelos que incluían, sucesivamente, el efecto del área basimétrica de la parcela, de la altitud, de la orientación, o de si el rodal había

sufrido un incendio en las últimas décadas. Para estos dos últimos factores se testó también la interacción entre el índice espectral y la orientación, para detectar posibles diferencias en la relación entre variables para solanas y umbrías. La comparación de dichos modelos con el modelo simple – procedente del paso anterior – se realizó con los indicadores antes mencionados.

Finalmente, se analizó el posible efecto de la sequía en la incidencia de la culebrilla del corcho (*Coroebus undatus*) mediante un modelo binomial donde la variable respuesta fue la proporción de alcornoques con incidencia alta o muy alta de culebrilla, y la variable explicativa fue un índice espectral de sequía.

4. Resultados

4.1 Datos de campo y pela del corcho

Los alcornocales muestreados presentaban una densidad muy variable, entre 80 y 1100 pies por hectárea, con una media cercana a los 500 pies/ha, sin que hubiera diferencias significativas entre solanas y umbrías (Figura 3a). El diámetro cuadrático medio de los alcornoques fue de 23.4 cm, con un rango entre 14 y 37 cm. En consecuencia, los valores de área basimétrica muestreados variaron de manera también considerable, con una media de 18.9 m²/ha, sin que tampoco se apreciaran diferencias entre orientaciones (Figura 3c). De media, en el 60% de los alcornoques que presentaban signos de haber comenzado el descorche, éste se había podido realizar sin problemas, si bien el porcentaje fue mucho más bajo en algunas de las parcelas muestreadas (Figura 3d).

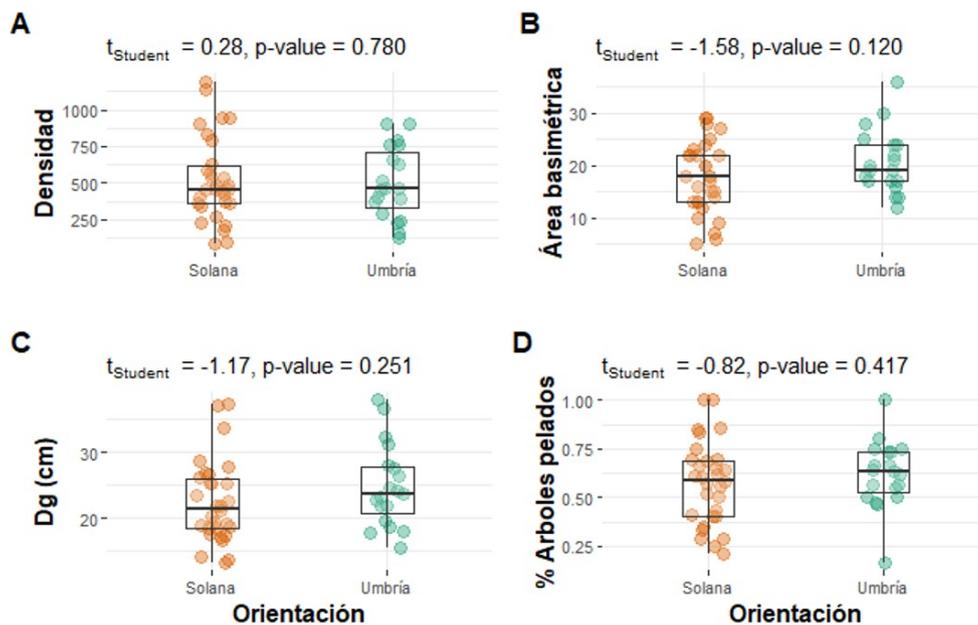


Figura 3: Distribución de los valores de densidad (A), área basimétrica (B), diámetro medio cuadrático (C), y porcentaje de árboles pelados (D) para las 49 parcelas muestreadas, separadas entre solana y umbría

4.2 Índices para el seguimiento del estado hídrico y calidad de extracción del corcho

Todos los índices evaluados mostraron una relación significativa con el porcentaje de árboles pelados, si bien los datos de campo mostraron gran dispersión (Figura 4). La relación entre ambas variables fue siempre positiva salvo en el caso del *Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)*, que mostró una relación negativa. Los valores de error medio cuadrático fueron muy similares para todos los índices, alrededor



de 0.18, si bien las métricas de desempeño mostraron los mejores indicadores para *Normalised Multi-band Drought Index* (NMDI) (Tabla 1). No obstante, la diferencia de AICc con los modelos que incluían DWSI y NREDI fueron muy bajas, inferiores a dos puntos, lo que indica que estos dos índices también se comportan de manera similar a NMDI como predictores de la aptitud del alcornoque para llevar a cabo la extracción del corcho.

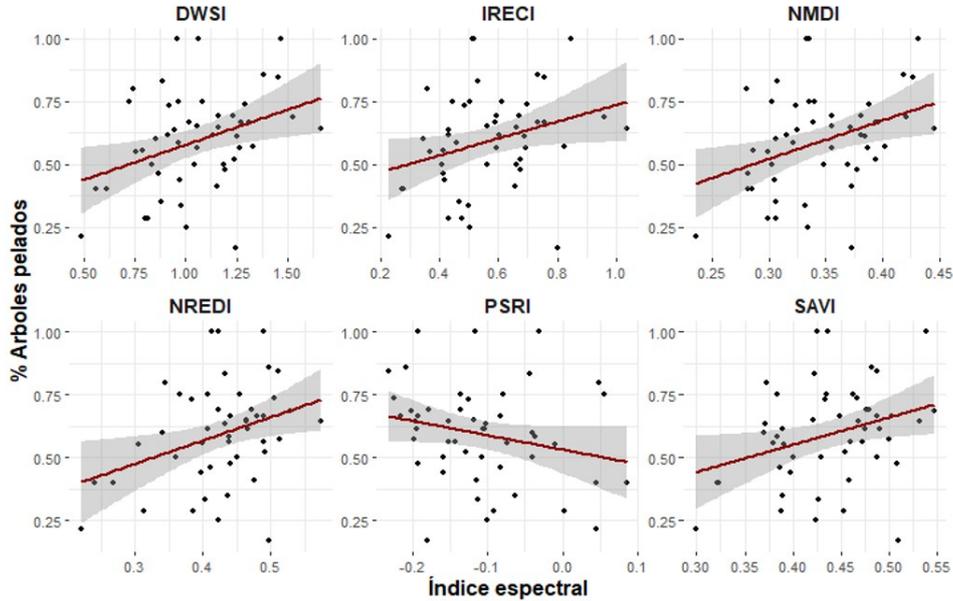


Figura 4: Relación entre diversos índices espectrales de seguimiento del estado hídrico y la calidad de extracción del corcho, medida como proporción de árboles pelados sin daños aparentes.

Tabla 1. Indicadores de desempeño de los índices espectrales como predictores del porcentaje de éxito en la extracción del corcho

Índice	Coef.	p-value	RMSE	AICc	BIC	Δ AICc	Akaike	weights	Performance	score
NMDI	5.749	0.00045	0.181	243.69	247.21	0.00	0.43	83.3%		
DWSI	1.077	0.00061	0.182	244.22	247.74	0.33	0.33	66.0%		
NREDI	3.450	0.00140	0.183	245.87	249.39	0.15	0.15	38.1%		
PSRI	-2.191	0.02041	0.189	250.82	254.34	7.13	0.01	32.1%		
SAVI	4.001	0.00475	0.185	248.16	251.69	4.48	0.05	20.0%		
IRECI	1.231	0.00720	0.186	248.88	252.40	5.19	0.03	16.6%		

4.3 Efectos de otras variables explicativas sobre la calidad de extracción del corcho

Ni el área basimétrica ni la altitud resultaron predictores significativos de la calidad de extracción del corcho, ni tampoco su interacción con el NMDI (Tabla 2). Lo mismo se observó para la variable “quemado”, que recogía si la parcela muestreada se encontraba en un área afectada por incendios en las últimas décadas. En cambio, añadir la orientación como predictor sí resultó en una mejora



en el desempeño del modelo, mejorando en todos los indicadores respecto al modelo univariante (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de desempeño de los modelos bivariantes como predictores del porcentaje de éxito en la extracción del corcho. El p-valor de cada variable indica la significación de dicha variable al añadirla al modelo univariante.

Variable	p-value	RMSE	AICc	BIC	Δ AICc	Akaike	weights	Performance	score
Orientación	0.01696	0.176	240.68	248.25	0.00	0.50		75.1%	
NMDI*	0.00045	0.181	243.69	247.21	2.10	0.17		45.8%	
Quemado (sí/no)	0.102957	0.176	243.94	250.60	2.35	0.15		44.1%	
Altitud	0.26097	0.178	244.69	249.84	3.10	0.11		25.9%	
Área Basimétrica	0.511585	0.181	245.53	250.67	3.94	0.07		24.5%	

* NMDI: modelo univariante

Los resultados del modelo que incluía NMDI y orientación mostraron que ambas variables tenían un efecto significativo, así como la interacción entre ellas (Tabla 3). Así, el efecto del NMDI en el descorche fue positivo en las parcelas de solana, mientras que dicho indicador no tuvo un efecto en el éxito de la pela para las parcelas de umbría (Figura 5a). Esta diferencia entre orientaciones no puede explicarse por los diferentes valores de NMDI entre solanas y umbrías, ya que no existen diferencias en la distribución de los valores del índice, si bien sí destaca que existen menos parcelas de umbría con valores bajos de NMDI (Figura 5b), y también existen menos parcelas de umbría con valores bajos de la variable dependiente, el porcentaje de árboles pelados (Figura 3d).

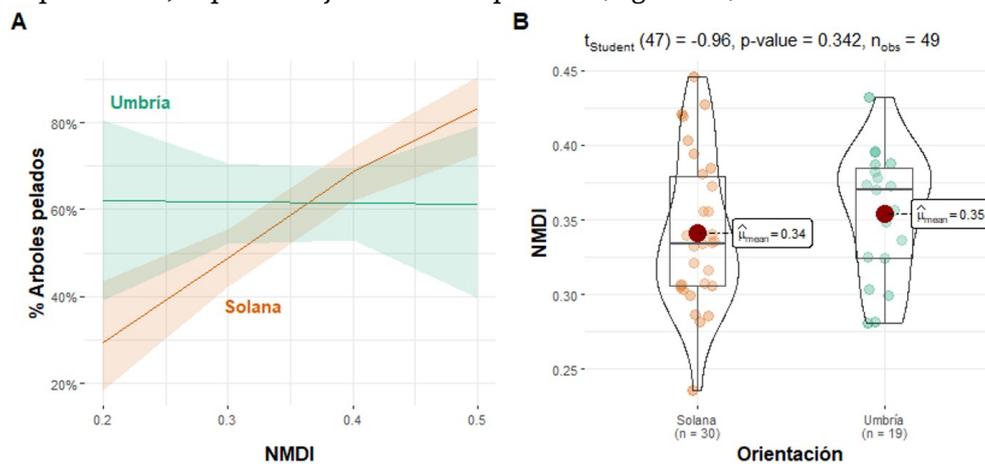


Figura 5: (A) Interacción entre el índice de humedad NMDI y la orientación para la predicción de la extracción del corcho, medida como porcentaje de árboles pelados sin daños. (B) Diagrama de cajas y violines mostrando la distribución de valores de NMDI para las orientaciones de solana y umbría. Se muestra en la parte superior el resultado de una prueba de la t de Student para diferencias entre medias de las dos orientaciones.

4.4 Relación entre los índices para el seguimiento del estado hídrico y la afectación de culebrilla del corcho

El modelo ajustado mostró una relación altamente significativa entre el índice espectral NMDI y la afectación de la culebrilla del corcho, medida como la proporción de árboles con afectación moderada o severa. En concreto, un valor mayor de NMDI, que implica un menor grado de estrés hídrico, se asoció con menores proporciones de afectación moderada y severa de la culebrilla (Figura 6). Esta relación, aunque preliminar, parece sugerir que los árboles en situaciones de estrés pueden ser más susceptibles a ser afectados por esta plaga.

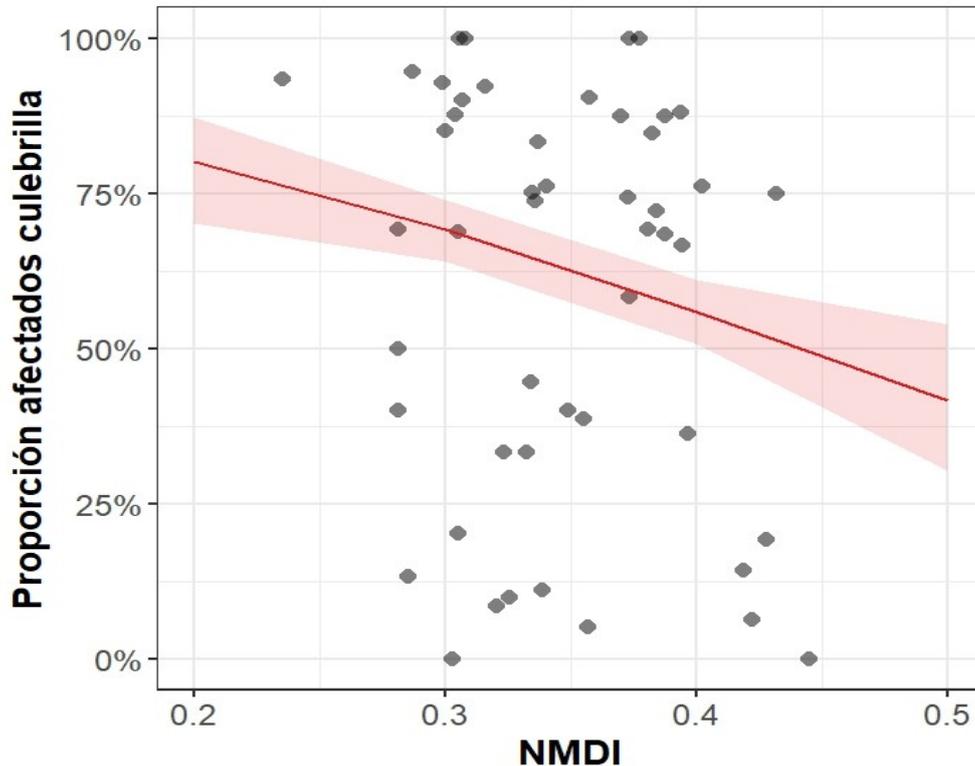


Figura 6: Relación entre el índice espectral de seguimiento del estado hídrico NMDI y la afectación de culebrilla del corcho, medida como proporción de árboles con afectación moderada y severa

5. Discusión

En el presente estudio, se exploró la relación entre índices espectrales obtenidos mediante teledetección y la aptitud para el descorche en alcornoques de Cataluña durante la campaña de 2024. Los resultados obtenidos permitieron identificar que, aunque todos los índices evaluados mostraron una relación significativa con el porcentaje de éxito en la extracción del corcho, el *Normalised Multi-band Drought Index* (NMDI) demostró ser el mejor predictor, con indicadores de desempeño superiores y una relación positiva clara con la calidad del descorche.

Los hallazgos son consistentes con estudios previos que destacan el potencial de los índices de teledetección para evaluar el estado hídrico de la vegetación. En particular, los resultados refuerzan la utilidad del NMDI, previamente identificado como un índice sensible para evaluar la gravedad de la sequía (WANG Y QU, 2007). Recientemente, MORENO-FERNÁNDEZ et al. (2021), observaron que índices de humedad como el NMDI presentan una alta sensibilidad en la detección de



pérdidas de vigor por estrés hídrico, pudiendo utilizarse como señales de alerta temprana. Estudios como los de BOCHENEK et al. (2018) y MIGAS-MAZUR et al. (2021) también han demostrado el uso exitoso de índices espectrales similares, como el DWSI, en el monitoreo del impacto de la sequía en ecosistemas forestales. Además, CANDOTTI et al. (2022) resaltaron la utilidad de estos índices para detectar cambios en la salud de los bosques, destacando su aplicabilidad en contextos de toma de decisiones de gestión forestal. Nuestros resultados van sin duda en la misma línea, mostrando una clara relación entre los índices espectrales testados y diversas variables de importancia para el aprovechamiento del corcho, como son la facilidad de ejecución de la pela y la afectación de la culebrilla del corcho. Si bien la literatura existente aún es limitada en lo que respecta al monitoreo de alcornoques, este estudio contribuye a cerrar esta brecha al aplicar estos índices en un sistema forestal específico con alta relevancia económica y ambiental.

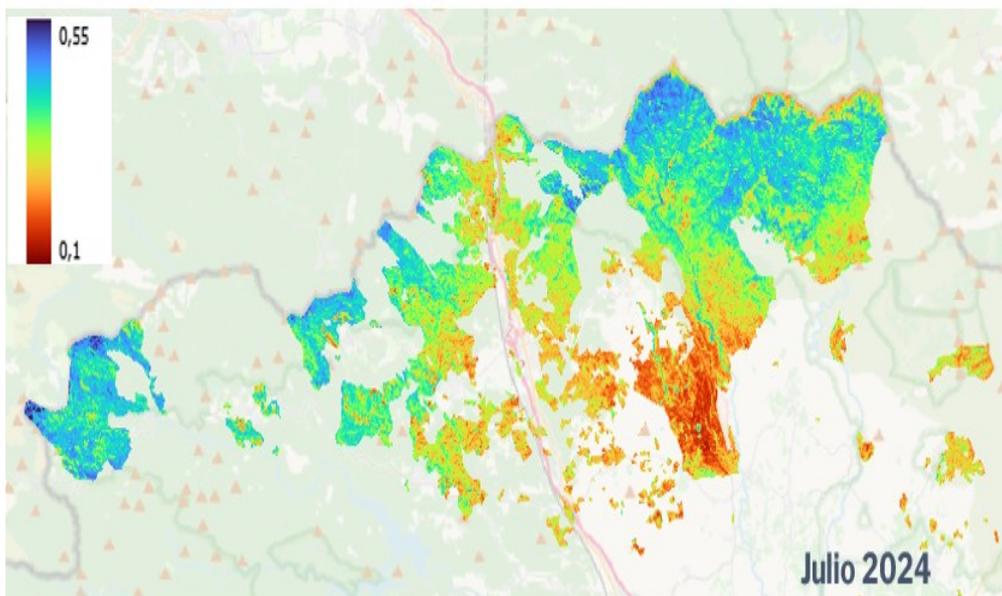
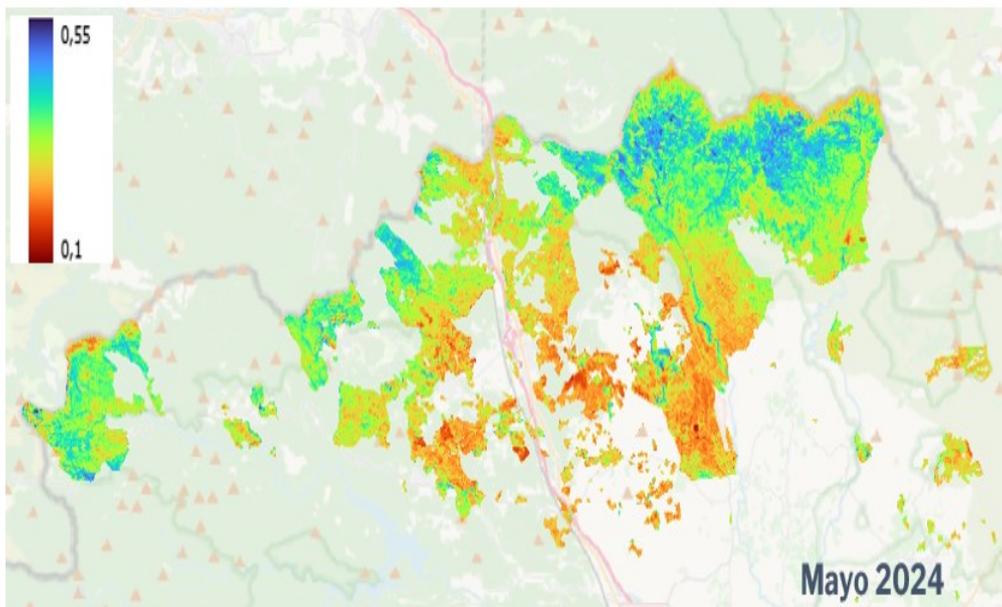
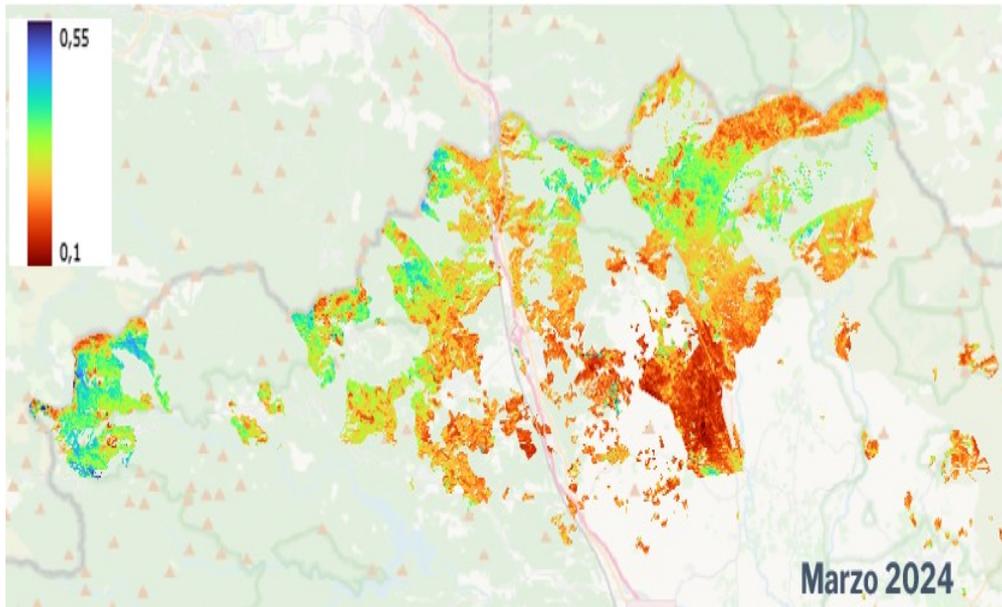


Figura 6: Muestra de valores del NMDI en tres fechas durante la campaña 2024 en la zona de Alt Empordà. Los valores más altos indican un mejor estado hídrico de la vegetación, y los más bajos un estado hídrico deficiente.

Nuestros resultados mostraron que la orientación de las parcelas (solana versus umbría) condiciona la capacidad predictiva de los índices, siendo esta superior en las solanas. Este es un aspecto que deberá seguir estudiándose, pero nuestros datos apuntan a que la menor variabilidad tanto en valores del índice NMDI (con menos casos en el rango bajo del índice), como en valores del porcentaje de árboles descorchados (también con menos casos en el rango bajo) en las umbrías respecto a las solanas, podrían estar detrás de este comportamiento. Es habitual que las orientaciones de umbría conserven una mejor situación de disponibilidad hídrica por más tiempo aún bajo efectos de sequía, y los rangos de valores observados se ajustan a este hecho, que pone de manifiesto la importancia de las condiciones microclimáticas y topográficas en la aptitud para el descorche.

Este trabajo subraya la importancia de incorporar nuevas tecnologías y metodologías de análisis en la gestión forestal sostenible de los alcornocales. Al aprovechar herramientas como la teledetección para optimizar los trabajos de descorche, se pueden minimizar los daños producidos al árbol y maximizar los rendimientos de las operaciones. Como señalan OLIVEIRA et al. (2016), una gestión adecuada que tenga en cuenta las condiciones fisiológicas del alcornoque es clave para garantizar su regeneración y sostenibilidad a largo plazo. En este sentido, los avances presentados en este estudio representan un paso significativo hacia la mejora de las prácticas forestales en un contexto de creciente variabilidad climática.

Futuras investigaciones deberán centrarse en evaluar la robustez de estos índices en condiciones climáticas variables, así como explorar la posibilidad de integrar índices adicionales que consideren factores como la estructura del dosel. También sería valioso ampliar la escala temporal y geográfica del estudio para garantizar su aplicabilidad en otras regiones productoras de corcho.

6. Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que los índices espectrales obtenidos mediante teledetección son herramientas valiosas para predecir la aptitud para el descorche en alcornocales de Cataluña, así como la afectación por la culebrilla del corcho (*Coroebus undatus*). Entre los índices evaluados, el *Normalised Multi-band Drought Index* (NMDI) se destacó como el mejor predictor, evidenciando una relación positiva clara con el éxito en la extracción del corcho. Este hallazgo refuerza el potencial del NMDI como indicador clave en la monitorización del estado hídrico de los alcornocales y en la optimización de las prácticas de manejo forestal.

El estudio también resalta la influencia de las condiciones microclimáticas, como la orientación de las parcelas, en la capacidad predictiva de los índices espectrales. La superioridad de las predicciones en parcelas de solana sugiere la necesidad de considerar factores topográficos y de disponibilidad hídrica al interpretar los índices. Este resultado enfatiza la importancia de integrar datos contextuales en modelos predictivos para mejorar su precisión y aplicabilidad.

La aplicación de tecnologías avanzadas, como la teledetección, en la gestión forestal sostenible de los alcornocales representa un avance significativo para minimizar los daños al arbolado y optimizar los rendimientos de las operaciones



de descorche. Este enfoque no solo permite una mejor planificación, sino que también contribuye a garantizar la regeneración y sostenibilidad del alcornoque, especialmente en un contexto de creciente variabilidad climática.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a las Ayudas para la preparación de proyectos de grupos operativos de la Asociación Europea para la Innovación en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas (AEI-Agri), en el marco del Plan estratégico de la PAC 2023-2027 (Intervención 7161), a través de las cuales el Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de la Generalitat de Catalunya ha financiado el proyecto "Preparació del Grup Operatiu per a l'aplicació de noves tecnologies a l'optimització de la gestió i l'aprofitament de les suredes a Catalunya (GO SURO)". Los autores agradecen a Trefinos S.L. la ayuda prestada en la gestión y coordinación del proyecto.

8. Bibliografía

ARONSON, J.; PEREIRA, J. S.; PAUSAS, J. G. 2009. *Cork Oak Woodlands on the Edge: Ecology, Adaptive Management, and Restoration*. Island Press. 352 páginas. Washington, DC.

BOCHENEK, Z., ZIOLKOWSKI, D., BARTOLD, M., ORLOWSKA, K., Y OCHTYRA, A. 2018. Monitoring forest biodiversity and the impact of climate on forest environment using high-resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing* 51(1), 166-181.

CANDOTTI, A., DE GIGLIO, M., DUBBINI, M., TOMELLERI, E. 2022. A Sentinel-2 Based Multi-Temporal Monitoring Framework for Wind and Bark Beetle Detection and Damage Mapping. *Remote Sensing* 14, 6105.

DUSSEUX, P., GUYET, T., PATTIER, P., BARBIER, V., Y NICOLAS, H. 2018. Monitoring of grassland productivity using Sentinel-2 remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72, 141-153.

FRAMPTON, W. J., DASH, J., WATMOUGH, G., Y MILTON, E. J. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 34(17), 6211-6239.

GITELSON, A., Y MERZLYAK, M. N. 1994. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 22(3), 247-252.

HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment* 25(3), 295-309.

MIGAS-MAZUR, R.; KYCKO, M.; ZWIJACZ-KOZICA, T.; ZAGAJEWSKI, B. 2021. Assessment of Sentinel-2 Images, Support Vector Machines and Change Detection Algorithms for Bark Beetle Outbreaks Mapping in the Tatra Mountains. *Remote Sensing* 13, 3314.

MORENO-FERNÁNDEZ, D., VIANA-SOTO, A., CAMARERO, J. J., ZAVALA, M. A., TIJERÍN, J., Y GARCÍA, M. 2021. Using spectral indices as early warning signals of forest dieback: The case of drought-prone *Pinus pinaster* forests. *Science of the Total Environment*, 793, 148578.

OLIVEIRA, V.; et al. 2016. Growth patterns of cork oak trees under contrasting climatic conditions in Portugal. *Dendrochronologia* 37: 79-89.

PEREIRA, H. 2007. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier. 336



páginas.Amsterdam.

SOTO, G. E., PÉREZ-HERNÁNDEZ, C. G., HAHN, I. J., RODEWALD, A. D., Y VERGARA, P. M. 2017.Tree senescence as a direct measure of habitat quality: Linking red-edge vegetation indices to space use by Magellanic woodpeckers. *Remote Sensing of Environment* 193, 1-3.

VARGHESE, D., RADULOVIĆ, M., STOJKOVIĆ, S., Y CRNOJEVIĆ, V. 2021. Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing the drought.*Remote sensing*,13(17), 3355.

VAZ, M.; et al. 2011. Cork oak (*Quercus suber*) physiological responses to drought: Insights and implications. *Tree Physiology* 31: 616–629.

WANG, L., y QU, J. J. 2007. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing.*Geophysical Research Letters*, 34(20).