



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1528**

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

Organiza





## Uso de índices espectrales para la detección de *Fomes inzengae* en álamos blancos

RELLO SÁNCHEZ C. (1)(2), BORRAJO MILLÁN J.M. (2), PÉREZ DANIËLS P.J. (2), PEREA GARCÍA-CALVO R. (1)

(1) Plant & Animal EcoLogY Lab (PAELLA). Centro para la Conservación de la Biodiversidad y el Desarrollo Sostenible (CBDS). ETS. Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. C/José Antonio Novais 10, 28040 Madrid.

(2) Dasotec Soluciones De Ingenieria SL. C/ Adolfo Pérez Esquivel, 3, 28232. Parque Empresarial Las Rozas (Madrid).

### Resumen

El uso de sensores multi- e hiperespectrales para el estudio de la vegetación nos permite identificar factores de estrés asociados a determinadas respuestas espectrales. Este estudio se enfoca en la evaluación de los efectos del hongo *Fomes inzengae* en individuos de *Populus alba* var. *bolleana*. El objetivo principal es comparar la señal espectral de las hojas y de la corteza de árboles afectados por el hongo con aquellos aparentemente sanos. Concretamente, se han analizado 31 índices espectrales obtenidos con el Plant-O-Meter (sensor de 6 bandas espectrales) en las hojas y corteza de *Populus*. Se seleccionaron 20 individuos del arbolado urbano de la ciudad de Madrid, 10 con presencia evidente del hongo y 10 sin signos visibles de infección, en un diseño pareado (parejas de dimensiones similares y próximas entre sí). Los resultados indican que tan solo el 38,7% de los índices analizados mostraron diferencias marginalmente significativas entre la reflectancia medida en las hojas de árboles sanos e infectados. Sin embargo, la reflectancia de la corteza presentó diferencias significativas entre ambos grupos en todas las bandas y en el 51,6% de los índices analizados. Esta información contribuirá a mejorar la comprensión de los efectos de *Fomes inzengae* en *Populus alba*, lo que podría servir como base para el desarrollo de técnicas de monitoreo que faciliten la gestión del arbolado urbano.

### Palabras clave

Multiespectral, fitopatógenos, arbolado urbano, teledetección, *Populus*.

#### 1. Introducción

El arbolado urbano cumple un papel fundamental dentro de las ciudades, regula el microclima, mejora la calidad del aire y tiene beneficios en la salud de las personas (ESCOBEDO et al., 2011; JIM & CHEN, 2009; LIVESLEY et al., 2016; SALMOND et al., 2016). Sin embargo, el arbolado urbano suele presentar múltiples problemas fitosanitarios. En el entorno urbano se dan condiciones propicias para la aparición de hongos descomponedores y fitopatógenos. Un caso muy común es la infección de *Fomes inzengae* (Ces. & De Not.) Cooke, muy afín a *Fomes fomentarius* (L.) Fr. en la Península Ibérica (PEINTNER et al., 2019). En la ciudad de Madrid, existen numerosas especies hospedantes para este hongo entre las que destacan: *Acer saccharinum*, *Aesculus hippocastanum*, *Ailanthus altissima*, *Celtis australis*, *Laurus*, *Morus nigra*, *Populus alba*, *Populus alba* var. *bolleana*, *P. X canadensis*, *Platanus X hispanica*, *Styphnolobium japonicum* y *Ulmus pumila* (PÉREZ DANIËLS y BORRAJO MILLÁN, 2021). Este patógeno infecta al árbol a través de heridas o ramas rotas. Puede permanecer como endófito en el interior del hospedante y generar cuerpos fructíferos cuando el árbol se encuentra débil o estresado (SCHWARZE et al., 2000). La zona de actuación es en el cuello, tronco y

ramas superiores que se encuentran en pudrición en árboles vivos o muertos y también puede micorrizar con las raíces (PÉREZ DANIELS y BORRAJO MILLÁN, 2021). Se trata de un hongo xilófago de pudrición blanca simultánea que se extiende de manera radial y longitudinal a través de los vasos del xilema. Esta propagación a través de la madera genera cicatrices longitudinales en la corteza (Figura 1A) debido a la destrucción local del cambium (SCHWARZE et al., 2000). Estas cicatrices son características de la madera degradada, lo que facilita la detección de individuos infectados.



Una de las especies más comúnmente atacadas por *Fomes inzengae* en la ciudad de Madrid es *Populus alba* var. *bolleana* (Lauche) Ed. Otto, especie caducifolia de



crecimiento rápido. Es de porte estrecho, hasta 25-30 metros de altura y de corteza lisa blanquecina, que muestra grietas originadas por las ramas a lo largo del tiempo. Posee una madera poco compacta muy sensible a las pudriciones. Por eso, la infección de *Fomes inzengae* puede generar rápidamente daños estructurales en el árbol, aumentando el riesgo de rotura o caída y convirtiéndolo en un peligro potencial para la seguridad pública.

La detección de la infección del hongo en esta especie se realiza a través de una evaluación visual. Esta metodología es lenta y costosa ya que requiere de la inspección individual de cada árbol y la posible intervención de expertos para confirmar la presencia del hongo. Además, puede no servir para la identificación temprana del patógeno. Por esto, es conveniente investigar el uso de nuevas tecnologías que permitan realizar una detección rápida y temprana. En este trabajo se propone la utilización de sensores multiespectrales para la detección de *Fomes inzengae* en *Populus alba* var *bolleana*. Estos sensores se han popularizado en las últimas décadas, ya que el uso de índices ópticos de vegetación ha resultado ser muy útil en la detección de estrés en la vegetación. Recientemente, se han desarrollado multitud de aplicaciones basadas en teledetección en el ámbito del arbolado urbano: inventario, localización, monitorización de la salud de la vegetación (XIAO & MCPHERSON, 2005), etc... A pesar de esto, la utilización de técnicas de teledetección requiere una calibración previa mediante estudios de campo. Existen pocos trabajos que analicen el uso de sensores espectrales para la detección de hongos patógenos en arbolado (POBLETE et al., 2023). En particular, este es el primer estudio del que tenemos constancia en analizar la afección de *Fomes inzengae* en *Populus alba* var *bolleana* a través de posibles diferencias en la respuesta espectral. Para ello, se plantea el uso del sensor Plant-O-Meter (POM). Este dispositivo recoge seis bandas espectrales en cada medida: azul (455 nm), verde (528 nm), rojo (657 nm), "RedEdge" (740 nm), NIR1 (810 nm) y NIR2 (940 nm), a partir de las cuales calcula directamente 31 índices ópticos de vegetación (OVI) (Tabla A1 de anexos). No requiere calibración previa ya que emite un flash que se activa en cada medición. Gracias a estas características su uso es rápido, eficiente y fácil de manejar.

## 2. Objetivos

El objetivo general es analizar el posible uso del POM para detectar individuos de *Populus alba* var *bolleana* afectados por el hongo *Fomes inzengae*. Este objetivo general abarca los siguientes objetivos específicos:

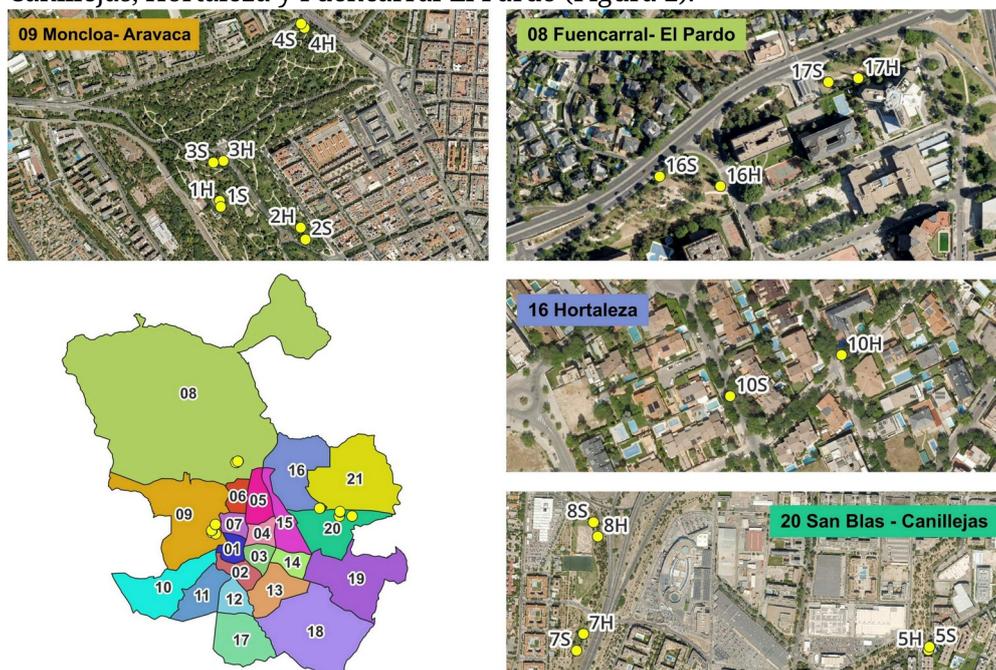
1. Evaluar la respuesta espectral (bandas e índices espectrales) de las hojas maduras de *P. alba* var *bolleana* urbanos en individuos sanos y afectados por *Fomes inzengae*.
2. Analizar la respuesta espectral (bandas e índices espectrales) de la corteza del tronco entre individuos sanos y afectados por *Fomes inzengae*, controlando la exposición (cara del tronco) y altura del tronco.
3. Seleccionar los índices espectrales más eficientes para la detección del patógeno *Fomes inzengae* y proponer un protocolo de medición para su posible uso en arbolado urbano (altura del tronco, exposición, costes, etc).

## 3. Metodología

### Área de estudio

El estudio se realizó en el área urbana de Madrid (t. m. de Madrid, España),

concretamente en los distritos de Moncloa-Aravaca (Parque del Oeste), San Blas-Canillejas, Hortaleza y Fuencarral-El Pardo (Figura 2).



### Toma de datos

Se realizó un muestreo pareado, eligiendo 10 individuos maduros de *Populus alba* var. *bolleana* con una evidente infección del hongo *Fomes inzengaey* otros 10 individuos aparentemente sanos (sin signos visibles de infección). Los individuos seleccionados fueron de dimensiones similares y todos ellos pertenecientes al arbolado urbano de Madrid situados en pradera, terrizo o en alcorque. Cada pareja de árboles se encontraba en una misma zona con condiciones ambientales idénticas (distancia entre individuos de la misma pareja < 78 metros). Para cada árbol se tomaron diversas medidas dendrométricas (altura y diámetro normal), así como sus coordenadas GPS mediante GPSMAP® 64s. Se determinó la altura utilizando un hipsómetro Nikon Forestry Pro y el perímetro del tronco se midió a la altura normal (130 cm del suelo) con cinta métrica.

A cada individuo se le asignó un nivel de afección por *Fomes inzengae* que oscilaba entre 0 (sin signos de infección) y 5 (máximo nivel de infección) establecidos en la Tabla 1.

No se observa presencia de hongo ni se ve afectada la vitalidad del árbol.
Nula o escasa presencia de fructificaciones y estrías localizadas. No se ve afectada la vitalidad.
Numerosas estrías y/o cuerpos fructíferos. Sin aparente afección sobre la vitalidad de la copa.
Numerosas estrías y cuerpos fructíferos. Alguna rama seca (<10% de las ramas secas).
Numerosas estrías y cuerpos fructíferos. Numerosas ramas afectadas (entre 10 y 50 % de las ramas secas).
Numerosas estrías y cuerpos fructíferos. Decaimiento con fuerte afección sobre la copa (>50% de las ramas secas).

Asimismo, se midió la señal espectral de la corteza de cada individuo con el dispositivo POM, haciendo una medida en las 4 caras del tronco (N, E, S y O) del árbol y a dos alturas distintas: en la base (a 30 cm) y en el tronco (a 130 cm). El

sensor POM se colocó a 30 cm de distancia de la superficie a muestrear. Además, se recogió una muestra de entre 5 y 10 diez hojas maduras en cada orientación de la copa (N, E, S y O) con ayuda de una pértiga (con excepción de las situaciones en las que las hojas se encontraban a más de seis metros de altura o cuando la copa estaba seca). Posteriormente, las muestras de hojas se guardaron en una nevera a 6 °C para su conservación hasta su medición en el laboratorio ese mismo día. En el laboratorio, las hojas de cada individuo (combinando las cuatro muestras de cada uno) se dispusieron cubriendo una superficie de 28 x 20 cm (560 cm<sup>2</sup>) con el haz hacia arriba para medir la señal espectral. El sensor POM se colocó de manera paralela por encima de la muestra, centrado y a una distancia de 30 cm sobre la misma (Figura 3).



### Análisis de datos

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el software estadístico R (R CORE TEAM, 2023) versión 4.3.2. aplicados a un diseño pareado (árbol afectado vs sano). Para las medidas de las hojas, en primer lugar, se comprobó la normalidad de los 31 OVI's utilizando la función "shapiro.test()" del paquete "stats". Para los índices que seguían una distribución normal se realizó una prueba de Student pareado mediante la función "ttest()" del paquete "stats", asegurándose de marcar la opción para análisis pareados ("paired = TRUE"). Para aquellos índices que no seguían una distribución normal, se realizó una prueba de Wilcoxon, también pareado, mediante la función "wilcox.test()" del paquete "stats" para evaluar las diferencias significativas entre los grupos (afectados vs sanos).

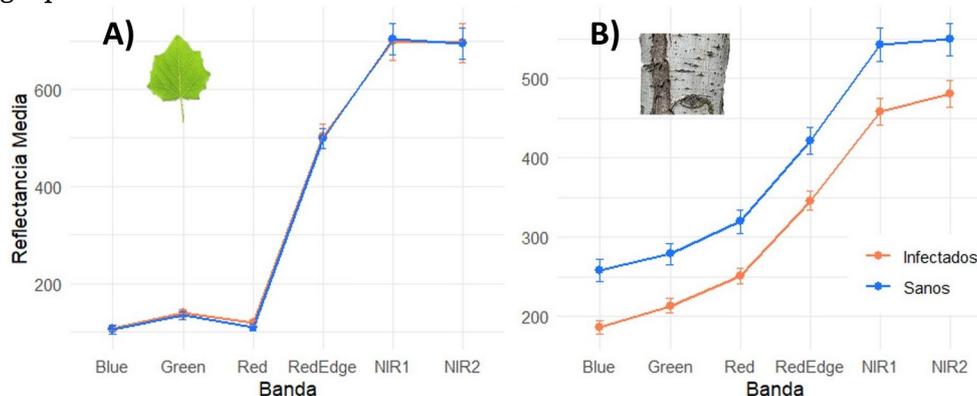
Para determinar diferencias significativas entre las bandas espectrales y los OVI de la corteza de árboles afectados y no afectados primero, se identificaron los valores atípicos de los índices, utilizando el método del rango intercuartílico (SCHWERTMAN et al., 2004). Se ajustó un modelo lineal mixto (LMM) para cada banda e índice, estableciendo como variable respuesta la banda o índice a analizar. Las variables explicativas con efecto fijo fueron la infección (variable binomial; afectado o sano), la cara del tronco (N, S, E y O) y la altura (30 ó 130 cm), mientras que el individuo se incluyó como efecto aleatorio anidado dentro de la pareja. Este efecto aleatorio anidado se incluye para controlar la ausencia de independencia (pseudorréplicas) entre las caras de un mismo individuo e incluir la comparativa

por parejas (afectado vs. sano) bajo unas mismas condiciones ambientales, disminuyendo el posible ruido estadístico.

Se comprobó que se cumplía el supuesto de normalidad para los residuos de los modelos mediante las funciones *agostino.test()* (test de Skewness). En caso de que no se cumpliera este supuesto, se realizó una transformación logarítmica de la variable respuesta mediante la función *log()*.

#### 4. Resultados

Los resultados encontrados del análisis de las muestras de hojas mostraron que ninguna de las bandas se diferenció significativamente entre los grupos de infectados y sanos (Figura 4A), además, tan solo 12 de los 31 índices analizados (38,7%) mostraron ser marginalmente significativos ( $p$ -valor $<0,1$ ). Los índices cuyo  $p$ -valor fue marginalmente significativo fueron NDVIr, SR, SIPI, EVI, WDRVI, GRNDVI, RBNDVI, PNDVI, ISR, NDRER, SQRT, VARI. Estos índices mostraron valores más altos en los individuos sanos, es decir, aquellos sin signos de infección. (Tabla A2 y A3 de anexos). Excepto el índice ISR, que mostró valores más altos para el grupo de individuos infectados.

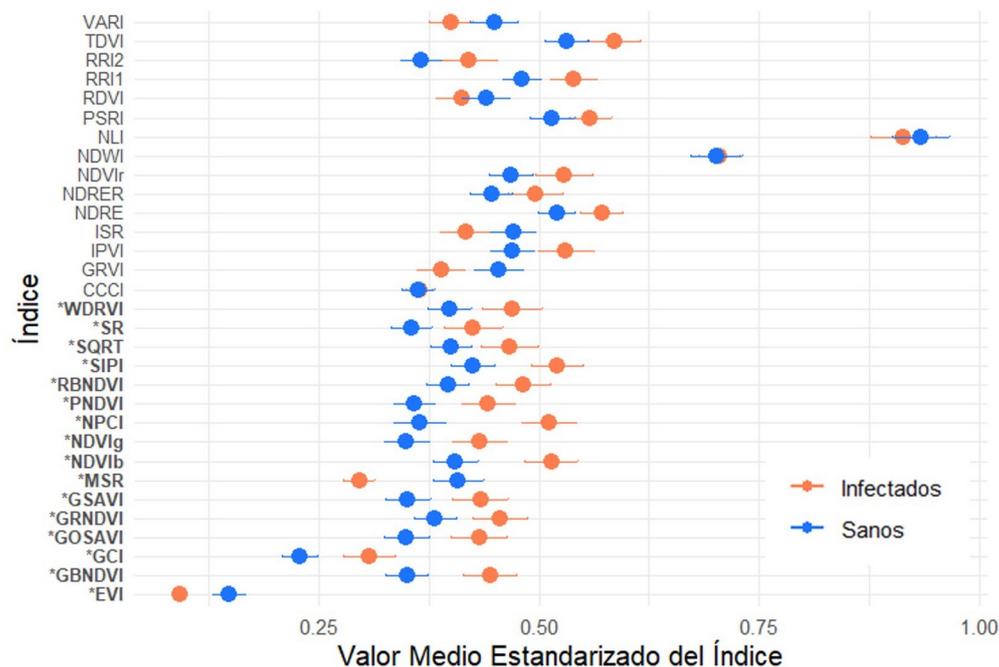


Los resultados encontrados de los LMM para las medidas de la corteza mostraron que para todas las bandas estudiadas la infección fue estadísticamente significativa (Tabla 2). Estas variables tuvieron valores mayores en los árboles sanos que en los infectados (Figura 4B).

0.000573049	0.733347453	0.000166971	0.111833546	0.93292783
0.00119509	0.738848894	0.000787336	0.109525124	0.818668755
0.001706642	0.18068377	4.68E-05	0.026285703	0.624220999
0.007604876	0.164996219	0.140225254	0.075573965	0.769416
0.019862352	0.050992743	0.732810384	0.080219403	0.844220762
0.046367143	0.005042661	0.936091753	0.264187579	0.777007156

La cara norte se diferenció significativamente de las demás para la mitad de las bandas estudiadas ( $p$ -valor $<0,05$ ), mostrando siempre valores más altos que las otras caras. En cuanto a las medidas realizadas en el tronco y en la base, no se encontraron diferencias significativas entre ambas alturas para casi ninguna de las bandas.

Se eliminó la cara norte del análisis de los OVI's porque muchos de ellos mostraron valores atípicos en estas medidas. Los resultados del análisis de los índices en las medidas de la corteza mostraron que 16 de los 31 OVI's (51,61%) calculados fueron significativamente diferentes entre los grupos de árboles infectados y no infectados (Figura 5).



## 5. Discusión

Las medidas de las muestras de hojas no mostraron diferencias significativas entre el grupo de árboles infectados y el de árboles sanos, o sin signos aparentes de infección. Este resultado sugiere que no hay diferencias en las características fisiológicas entre las hojas de ambos grupos, tales como los niveles de clorofila y otros pigmentos que influyen en la señal espectral de la vegetación (p.ej. antocianinas) con los valores analizados. Es importante considerar que las medidas se realizaron en las hojas maduras cubriendo una superficie concreta. Sin embargo, es posible que si se evalúa el conjunto completo de la copa sí se encuentren diferencias significativas. La densidad de hojas seguramente sea mayor en árboles sanos que en aquellos que tengan una menor vitalidad debido a la infección del hongo. Se encontraron 12 OVI's para los que la infección fue marginalmente significativa y 11 mostraron valores mayores en las muestras de los árboles aparentemente sanos. Estos índices se relacionan positivamente con la cantidad de biomasa verde, el contenido en clorofila, la ratio carotenoides/clorofila, el índice de área foliar. A pesar de que estas diferencias no fueron significativas, los resultados sugieren que existe un impacto potencial en las propiedades fisiológicas de las hojas maduras debido a la infección de *F. inzengae*. Las diferencias marginales de nuestros resultados podrían indicar que la medición de una muestra de hojas del individuo no permite una correcta detección de la infección. Sin embargo, posiblemente el análisis de la densidad y distribución de la copa revele un deterioro en el vigor del árbol debido al ataque del patógeno. Futuros estudios que incluyan una medición más exhaustiva de la señal espectral de las hojas, tanto a nivel individual como a nivel de copa, por ejemplo, abarcando mayor número de bandas espectrales, serían necesarios para la mejora de la eficacia de esta metodología. Igualmente, se requiere de mediciones fisiológicas



más específicas (p.ej. potencial hídrico, conductancia estomática, actividad fotosintética, producción de metabolitos secundarios, etc.) que permitan relacionar la respuesta espectral con el estado fisiológico y vigor de la planta.

La medición de la corteza ha resultado ser más eficaz a la hora de diferenciar entre individuos infectados y sanos, ya que la infección ha sido significativa para todas las bandas espectrales y más de la mitad de los índices calculados. Probablemente las diferencias observadas en la señal espectral se deban a las cicatrices o estrías que realiza el hongo en la misma al desarrollarse dentro del árbol. La coloración oscura de las estrías de la corteza se debe a la biosíntesis de melanina generada por la intensa actividad de las fenoloxidasas, enzimas que intervienen en la oxidación de compuestos fenólicos (SCHWARZE et al., 2000; TUDOR, 2013). La melanina es un pigmento biológico que tiene funciones de defensa, como la protección contra la radiación ultravioleta (UV), debido a su capacidad para absorber la luz. Este pigmento actúa como un escudo protector, absorbiendo la luz, particularmente en el rango del UV y el espectro visible, más pronunciado en la banda del azul. Nuestros resultados respaldan esta explicación, ya que la reflectancia medida en la corteza de los árboles infectados por *F. inzengae*, que mostraron estas estrías en su tronco, fue inferior que la de los árboles sanos para las bandas espectrales estudiadas, que abarcan desde los 455 nm hasta los 940 nm.

La cara norte de los árboles es la más umbría, y por esta razón aparece con frecuencia colonizada por musgos y líquenes. La mayoría de los árboles medidos en nuestro estudio presentaban estos organismos fotosintéticos en la corteza de la cara norte. En nuestras observaciones, esta cara mostró diferencias significativas respecto a las demás para la mitad de las bandas y muchos de los OVI's calculados mostraron valores atípicos en esta cara. La presencia de estos organismos influye en la señal espectral medida, pues poseen pigmentos fotosintéticos que absorben intensamente en las bandas del azul y el rojo. Por esta razón, esta cara de la corteza no es adecuada para el análisis de diferencias entre árboles afectados y sanos, ya que la señal observada se ve influenciada por otros factores que no se relacionan con el estado fitosanitario del árbol.

En relación con la altura de la medición, se observaron diferencias significativas en tan solo una de las bandas y en muy pocos índices. Esto parece indicar que, en general, es indiferente medir en la base del tronco (30 cm) o la altura normal (130 cm). Sin embargo, se apreció mayor variabilidad en las mediciones realizadas en la base, pues la presencia de otras plantas cercanas a la misma ha podido influir en la señal espectral captada por el sensor. Así, aunque en general no haya diferencias significativas entre ambas localizaciones del tronco, parece más adecuado medir en el tronco a una altura de 1,30 metros para asegurar una medida correcta de la señal espectral de la corteza, minimizando la posible variabilidad influenciada por factores externos.

## 6. Conclusiones

La eficacia del POM para la identificación de individuos de *P. albavar. bolleana* infectados por *Fomes inzengae* mediante la medición de sus hojas no mostró una gran eficacia. Tan solo 12 de los 31 índices analizados (38,7%) mostraron diferencias marginalmente significativas entre las hojas maduras de árboles sanos e infectados. Estos índices, correlacionados con la cantidad de biomasa verde, de clorofila y el área foliar, tuvieron valores marginalmente superiores en individuos sanos.



La eficacia del POM para la identificación de árboles infectados por *F. inzengae* mediante la medición de la reflectancia de su corteza mostró más eficacia. El 51,61% de los índices y todas las bandas espectrales resultaron ser significativamente mayores en árboles sanos que en infectados.

La cara norte mostró diferencias significativas en casi todos los índices y bandas, debido a que esta cara es colonizada por musgos y líquenes, por lo que presenta una mayor variabilidad y abundancia de valores atípicos de reflectancia. En cuanto a la altura, no mostró diferencias significativas en casi ningún índice. Por lo tanto, para futuras mediciones en corteza se debe evitar la cara norte y se recomienda tomar la medida a cierta altura para evitar la posible influencia de otras plantas en la proximidad de la base del tronco. Se requiere de más estudios, utilizando un sensor con un mayor número de bandas para tener una respuesta más completa de la posible variación en la firma espectral de los árboles afectados en comparación con los sanos. El POM resulta ser una herramienta de fácil uso, asequible (~700 €) y de fácil manejo que permite obtener un conjunto de índices ópticos de vegetación de manera inmediata y que han resultado ser sensibles a la presencia del patógeno *Fomes inzengae* en el tronco, abriendo la posibilidad de una nueva forma de detección temprana de patógenos con sintomatología en el tronco. En este trabajo se propone una clasificación de los niveles de afección causados por el patógeno *Fomes inzengae*. Sin embargo, no se ha estudiado su relación con la señal espectral, ya que en este estudio solo se han analizado las diferencias entre individuos afectados (en los niveles de 1 a 5) y aquellos aparentemente sanos (nivel 0). En trabajos futuros, sería relevante explorar posibles diferencias espectrales entre los distintos niveles de afección, ya que esta clasificación podría contribuir a una detección temprana más eficiente del patógeno.

#### 6. Agradecimientos

Agradecemos especialmente a A. Gómez-Muñoz por su valiosa ayuda en el trabajo de campo. Este trabajo ha sido financiado con una beca de doctorado industrial de la Comunidad Autónoma de Madrid (referencia IND2023/AMB-28816).

#### 6. Bibliografía

- AGAPIOU, A., HADJIMITSIS, D., & ALEXAKIS, D. (2012). Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks. *Remote Sensing*, 4(12), 3892–3919. <https://doi.org/10.3390/rs4123892>
- BANNARI, A., ASALHI, H., & TEILLET, P. M. (2002). Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. En *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (Vol. 5, pp 3053-3055) IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026867>
- CHEN, J. M. (1996). Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22(3), 229–242. <https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>
- CRIPPEN, R.E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, 34(1), 71–73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-Z)
- EHAMMER, A., FRITSCH, S., CONRAD, C., LAMERS, J., & DECH, S. (2010, October). Statistical derivation of fPAR and LAI for irrigated cotton and rice in arid Uzbekistan by combining multi-temporal RapidEye data and ground measurements. En *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII* (Vol. 7824, pp. 66-75). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.864796>
- ESCOBEDO, F. J., KROEGER, T., & WAGNER, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>



- GIROLIMETTO, D., & VENTURINI, V. (2013). Water Stress Estimation from NDVI-Ts Plot and the Wet Environment Evapotranspiration. *Advances in Remote Sensing*, 2(4), 283–291. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.24031>
- GITELSON, A. A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165–173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
- GITELSON, A. A., GRITZ, Y., & MERZLYAK, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>
- GITELSON, A. A., STARK, R., GRITS, U., RUNDQUIST, D., KAUFMAN, Y., & DERRY, D. (2002). Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2537–2562. <https://doi.org/10.1080/01431160110107806>
- GITELSON, A., & MERZLYAK, M. N. (1994). Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3), 286–292. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81633-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0)
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., & FERREIRA, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- JIM, C. Y., & CHEN, W. Y. (2009). Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities*, 26(4), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2009.03.003>
- JORDAN, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50(4), 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- LIVESLEY, S. J., MCPHERSON, E. G., & CALFAPIETRA, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- PEINTNER, U., KUHNERT-FINKERNAGEL, R., WILLE, V., BIASIOLI, F., SHIRYAEV, A., & PERINI, C. (2019). How to resolve cryptic species of polypores: An example in Fomes. *IMA Fungus*, 10, 17. <https://doi.org/10.1186/s43008-019-0016-4>
- PEÑUELAS, J., & FILELLA, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3(4), 151–156. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01213-8](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01213-8)
- PEÑUELAS, J., GAMON, J. A., GRIFFIN, K. L., & FIELD, C. B. (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46(2), 110–118. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90088-F](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90088-F)
- PÉREZ DANIÉLS, P., & BORRAJO MILLÁN, J. M. (2021). *Hongos xilófagos del arbolado urbano de Madrid* (1a ed.). Editorial Dasotec.
- POBLETE, T., NAVAS-CORTES, J. A., HORNERO, A., CAMINO, C., CALDERON, R., HERNANDEZ-CLEMENTE, R., LANDA, B. B., & ZARCO-TEJADA, P. J. (2023). Detection of symptoms induced by vascular plant pathogens in tree crops using high-resolution satellite data: Modelling and assessment with airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113698. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113698>
- R CORE TEAM. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>



- REN, S., CHEN, X., & AN, S. (2017). Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland. *International Journal of Biometeorology*, 61(4), 601–612. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1236-6>
- RIOS DO AMARAL, L., & MOLIN, J. P. (2014). The Effectiveness of Three Vegetation Indices Obtained from a Canopy Sensor in Identifying Sugarcane Response to Nitrogen. *Agronomy Journal*, 106(1), 273–280. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0504>
- ROUJEAN, J.-L., & BREON, F.-M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51(3), 375–384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- SALMOND, J. A., TADAKI, M., VARDOULAKIS, S., ARBUTHNOTT, K., COUTTS, A., DEMUZERE, M., DIRKS, K. N., HEAVISIDE, C., LIM, S., MACINTYRE, H., MCINNES, R. N., & WHEELER, B. W. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. En *Environmental Health: A Global Access Science Source* (Vol. 15). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- SCHWARZE, F. W. M. R., ENGELS, J., & MATTHECK, C. (2000). *Fungal Strategies of Wood Decay in Trees*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57302-6>
- SCHWERTMAN, N. C., OWENS, M. A., & ADNAN, R. (2004). A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational Statistics and Data Analysis*, 47(1), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2003.10.012>
- SRIPADA, R. P., HEINIGER, R. W., WHITE, J. G., & MEIJER, A. D. (2006). Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 98(6), 968–977. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0200>
- TUCKER, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- TUDOR, D. (2013). *Fungal Pigment Formation in Wood Substrate* (Tesis doctoral). University of Toronto.
- WANG, F., HUANG, J., TANG, Y., & WANG, X. (2007). New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. *Rice Science*, 14(3), 195–203. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(07)60027-4)
- XIAO, Q., & MCPHERSON, E. G. (2005). *Tree health mapping with multispectral remote sensing data at UC Davis, California*. *Urban Ecosystems*, 8, 349–361.

Anexos





