

Guerrero Cubero, C.; Calzado Carretero, A.; Aragonés Borrego, D.; Vázquez Piqué, J. Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de *Pinus nigra* en el sureste de España

Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de *Pinus nigra* en el sureste de España

Guerrero Cubero, Carlos ¹ Calzado Carretero, Anabel ¹ Aragonés Borrego, David ²
Vázquez Piqué, Javier ¹

¹ Universidad de Huelva, España

² Laboratorio SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (CSIC)

ORCID: Guerrero Cubero 0009-0008-3299-3541 Calzado Carretero 0000-0002-7300-477X Aragonés Borrego 0000-0003-4989-9005 Vázquez Piqué 0000-0002-7133-4142

Correspondencia: carlos.guerrero@dcaf.uhu.es carrete@dcaf.uhu.es daragones@ebd.csic.es jpique@uhu.es

RESUMEN

La protección de los bosques viejos (Old-Growth Forests, OGFs) es una prioridad global para la conservación de la biodiversidad. En los bosques mediterráneos de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, identificarlos es un desafío por su complejidad estructural y distribución fragmentada. Este estudio evalúa el potencial de la teledetección multisensor para estimar un índice de bosque viejo (OGI) en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. Combinamos datos estructurales de referencia (TLS) con predictores LiDAR aerotransportado (ALS, PNOA 2024) e imágenes satelitales (Sentinel-2 y WorldView-3). Aplicamos Regresión Lineal Múltiple (MLR), Random Forests (RF) y Support Vector Regression (SVR) para modelar el OGI. Los resultados demuestran que integrar métricas ALS con datos WorldView-3 mejora significativamente el poder predictivo. El modelo SVR obtuvo el mejor rendimiento (R^2 Cross Validation [CV] = 0,848), capturando la complejidad estructural de los OGFs. Aunque Sentinel-2 mostró un ajuste inferior (R^2 CV = 0,767), su gratuidad y resolución temporal, junto al LiDAR PNOA, lo perfilan como la herramienta más viable para el monitoreo a gran escala exigido por las políticas de conservación. Esta metodología híbrida proporciona una herramienta robusta para cartografiar y monitorizar los OGFs mediterráneos.




Palabras clave: Índice de bosque viejo, Escáner Láser Aéreo, Regresión lineal múltiple, Random Forest, Support Vector Regression

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 19 febrero 2026


Comparación de métricas de sensores WorldView-3 y Sentinel-2 con escáner láser aerotransportado para la identificación de bosques viejos de *Pinus nigra* en el sureste de España

Guerrero Cubero, Carlos ⁽¹⁾, Calzado Carretero, Anabel ⁽¹⁾, Aragonés Borrego, David ⁽²⁾, Vázquez Piqué, Javier ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Huelva, España.

 0009-0008-3299-3541, carlos.guerrero@dcaf.uhu.es ;  0000-0002-7300-477X, carrete@dcaf.uhu.es
 0000-0002-7133-4142, jpique@uhu.es

⁽²⁾ Laboratorio SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (CSIC).

 0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

Resumen: La protección de los bosques viejos (*Old-Growth Forests*, OGFs) es una prioridad global para la conservación de la biodiversidad. En los bosques mediterráneos de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, identificarlos es un desafío por su complejidad estructural y distribución fragmentada. Este estudio evalúa el potencial de la teledetección multisensor para estimar un índice de bosque viejo (OGI) en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. Combinamos datos estructurales de referencia (TLS) con predictores LiDAR aerotransportado (ALS, PNOA 2024) e imágenes satelitales (*Sentinel-2* y *WorldView-3*). Aplicamos Regresión Lineal Múltiple (MLR), *Random Forests* (RF) y *Support Vector Regression* (SVR) para modelar el OGI. Los resultados demuestran que integrar métricas ALS con datos *WorldView-3* mejora significativamente el poder predictivo. El modelo SVR obtuvo el mejor rendimiento (R^2 *Cross Validation* [CV] = 0,848), capturando la complejidad estructural de los OGFs. Aunque *Sentinel-2* mostró un ajuste inferior (R^2 CV = 0,767), su gratuidad y resolución temporal, junto al LiDAR PNOA, lo perfilan como la herramienta más viable para el monitoreo a gran escala exigido por las políticas de conservación. Esta metodología híbrida proporciona una herramienta robusta para cartografiar y monitorizar los OGFs mediterráneos.

Palabras clave: Índice de bosque viejo, Escáner Láser Aéreo, Regresión lineal múltiple, *Random Forest*, *Support Vector Regression*

Comparison of WorldView-3 and Sentinel-2 Sensor Metrics with Airborne Laser Scanning for Identifying Old-Growth Pinus nigra Forests in Southeastern Spain

Abstract: The protection of OGFs is a global priority for biodiversity conservation. In Mediterranean *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* forests, identifying these stands is challenging due to their structural complexity and fragmented distribution. This study evaluates the potential of multi-sensor remote sensing to estimate an OGI in the Sierra de Cazorla, Segura, and Las Villas Natural Park. We combined structural reference data from TLS with predictors derived from Airborne Laser Scanning (ALS, PNOA 2024) and satellite imagery (*Sentinel-2* and *WorldView-3*). Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest (RF), and Support Vector Regression (SVR) were applied to model the OGI. The results demonstrate that integrating ALS metrics with *WorldView-3* data significantly enhances predictive power. The SVR model yielded the best performance (cross-validation R^2 CV = 0.848), effectively capturing the structural complexity of OGFs. Although *Sentinel-2* showed lower accuracy (R^2 CV = 0.767), its free availability and temporal resolution, combined with PNOA LiDAR, position it as the most viable tool for large-scale monitoring required by conservation policies. This hybrid methodology provides a robust tool for mapping and monitoring Mediterranean OGFs.

Keywords: Old-Growth Index, Airborne Laser Scanning, Multiple Linear Regression, Random Forest, Support Vector Regression

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques viejos (*old-growth forests*, OGFs) se definen como rodales en estadios avanzados de la dinámica sucesional natural, caracterizados por una mínima intervención humana y la presencia de estructuras complejas que han tardado siglos en desarrollarse. Estos ecosistemas son refugios insustituibles de biodiversidad, donde los OGFs no gestionados albergan una riqueza de especies significativamente mayor que las masas gestionadas. Además, los OGFs desempeñan un papel crítico en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono estables y duraderos, tanto en la biomasa aérea como en el suelo.

A pesar de su valor, estos bosques son extremadamente escasos en Europa, ocupando menos del 3% de la superficie forestal, a menudo en un estado altamente fragmentado. En este contexto, la Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030 obliga a la identificación, cartografía y protección estricta de todos los bosques primarios y viejos. Sin embargo, los estudios sobre OGFs en la región mediterránea siguen siendo escasos; esta carencia resulta especialmente relevante para los OGFs de *P. nigra* localizados en zonas montañosas del sureste español (Tiscar & Lucas-Borja, 2016), lo que evidencia la necesidad de desarrollar cartografía específica para los OGFs de esta especie en el ámbito mediterráneo.

Un avance tecnológico decisivo para este objetivo es la disponibilidad de datos LiDAR aerotransportado (ALS) actualizados periódicamente a través de programas nacionales como el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA 2024). Mientras que el estudio previo desarrollado por Hevia *et al.* (2022) en el sureste español se basó en densidades de pulso bajas (0.5 pts/m²), los nuevos vuelos proporcionan densidades superiores a 5 pts/m², permitiendo una caracterización mucho más fina de la estructura vertical y la dinámica de huecos del dosel.

Por otra parte, estudios recientes como el de Adiningrat *et al.* (2024) señalan que la fusión de métricas ALS con índices espectrales de sensores de alta resolución es una estrategia eficaz para discriminar estadios sucesionales avanzados en bosques templados. La complementariedad de estas fuentes de datos está bien establecida: mientras el LiDAR captura la complejidad estructural 3D, los datos ópticos aportan información sobre el contenido de pigmentos y la estructura interna de la hoja, así como el vigor de la vegetación. Este trabajo explora si la integración de datos ALS con imágenes de diferente resolución espacial, como *WorldView-3* y *Sentinel-2*, permite obtener cartografía de precisión de los OGFs de *P. nigra* en el sureste español.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y caracterización de las masas

El estudio se localiza en el sector sur del Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén), una de las zonas con mayor presencia de rodales naturales de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. El clima es típicamente mediterráneo,

con sequías estivales severas y precipitaciones anuales que oscilan entre los 400 y 1900 mm.

Se establecieron 30 parcelas cuadradas de 0.25 ha, 15 en masas jóvenes y 15 en masas viejas. Las masas jóvenes se seleccionaron considerando como criterio que el diámetro normal (DBH) medio fuera menor de 20 cm, mientras que las masas viejas se eligieron teniendo en cuenta la estructura, la edad y la baja intensidad de la gestión.

2.2. Cálculo del Índice de Bosque Viejo (OGI)

Para cuantificar el nivel de madurez estructural, se empleó un índice de bosque viejo forestal (*Old-Growth Index*, OGI) basado en el índice definido por Spies y Franklin (1991) y adaptado para *P. nigra*. Este índice se basa en cuatro variables estructurales (Hevia *et al.*, 2022): (1) desviación estándar del diámetro normal (DBH), (2) densidad de árboles grandes (DBH >50 cm), (3) DBH medio y (4) densidad total de pies. A partir de estas cuatro variables se calculó el OGI, siguiendo la Ecuación 1:

$$OGI = 25 \sum_{i=1}^4 \left| \frac{x_i - x_{i \text{ joven}}}{x_{i \text{ viejo}} - x_{i \text{ joven}}} \right| \quad (1)$$

donde i corresponde a cada una de las cuatro variables estructurales (1–4), x_i es el valor observado para la i -ésima variable estructural; $x_{i \text{ joven}}$ es el valor característico de la i -ésima variable estructural para masas jóvenes; $x_{i \text{ viejo}}$ es el valor característico de la i -ésima variable estructural para masas viejas. Mediante esta ecuación, el OGI escala los valores entre 0 (rodales muy jóvenes) y 100 (rodales muy viejos).

Los valores de referencia para masas jóvenes ($x_{i \text{ joven}}$) y viejas ($x_{i \text{ viejo}}$) se obtuvieron del estudio de Hevia *et al.* (2022), realizado en la misma zona de estudio, donde se emplearon 21 parcelas de bosque viejo y 18 parcelas de bosque joven para definir los extremos del gradiente de madurez. Sobre esta base, se calculó el OGI para las 30 parcelas de este estudio (15 jóvenes y 15 viejas) siguiendo la ecuación 1.

2.3. Adquisición y procesamiento de datos de teledetección

Para obtener los datos de referencia estructurales de cada parcela, se utilizó un LiDAR terrestre (TLS) manual (BLK2GO, Leica Geosystems) con una densidad media de 420.000 pts/m². El procesamiento de las nubes de puntos TLS permitió reconstruir con exactitud la geometría de cada árbol y extraer el DBH de todos los árboles.

Los predictores ALS se derivaron del vuelo PNOA 2024, con una densidad de pulso media de 19.88 pts/m². El procesamiento se realizó con el paquete *lidR* en R, filtrando los retornos de vegetación entre 3 y 32 m de altura. Para asegurar la robustez ecológica, se priorizaron métricas que resumen la distribución vertical (percentiles, curtosis, rango intercuartílico). En total, se extrajeron 43 métricas ALS para cada parcela.

Además, a partir de ortofotos RGB-NIR del PNOA (0.25 m píxel) se calculó la fracción de cubierta (FCC), un descriptor clave de la estructura horizontal.

Se utilizó una imagen *Sentinel-2* del 21 de junio de 2024, coincidiendo con el máximo desarrollo del dosel, y una imagen *WorldView-3* del 5 de febrero de 2025, cuando el NDVI de *Pinus nigra* alcanza su máxima distintividad en ambientes mediterráneos (Aragones *et al.*, 2019).

Para evaluar el aporte específico de la resolución espacial y espectral, se construyeron y compararon dos conjuntos de predictores. Ambos conjuntos compartían el núcleo estructural de las 43 métricas ALS y la variable FCC. La diferencia radicaba en las variables espectrales añadidas:

SENT2_{set}: Incluyó 10 bandas originales de *Sentinel-2* y 12 índices de vegetación, cada uno caracterizado por su media, percentil 10 (P10) y percentil 90 (P90), totalizando 46 variables espectrales.

WVIEW3_{set}: Incluyó 7 bandas originales de *WorldView-3* y 15 índices de vegetación en formato media/P10/P90, totalizando 52 variables espectrales. Esta mayor resolución permite capturar la heterogeneidad espectral intra-parcela con mayor detalle.

2.4. Modelización Estadística

Se evaluaron tres algoritmos de modelización para identificar el que mejor capturase la relación entre las distintas variables predictoras señaladas y el OGI:

- Multiple Linear Regression (MLR): Limitados a un máximo de cinco variables predictoras no colineales ($VIF < 5$), seleccionando el mejor ajuste mediante el criterio de información de Akaike (AIC).
- Random Forest (RF): Se aplicó un filtro de correlación (>0.94) y selección por importancia (%IncMSE) para reducir predictores, utilizando 1,500 árboles y optimizando mtry mediante CV de 5-fold (Breiman, 2001).
- Support Vector Regression (SVR): El ajuste óptimo de C (coste) y γ (gamma) se realizó mediante CV de 5-fold; la coherencia entre R^2 entrenamiento y validación evidencia ausencia de sobreajuste, gracias al uso de funciones de núcleo (kernels) ante la alta dimensionalidad (Cortes & Vapnik, 1995).

3. RESULTADOS

La combinación de datos de WVIEW3_{set} superó a la de SENT2_{set} en todos los algoritmos probados. La Tabla 1 (a y b) resume el rendimiento de los modelos más competitivos.

Tabla 1a. Rendimiento predictivo para la estimación del OGI a partir de WVIEW3_{set}. (E) Entrenamiento; (OOB) Out of Bag; (CV) Validación Cruzada

Modelo	R ² ajustado (E)(OOB*)	Validación (R ² CV)	RMSE (CV*)
MLR	0.881	—	9.57
RF	0.678*	0.810	12.61*
SVR	0.903	0.848	11.20*

Tabla 1b. Rendimiento predictivo para la estimación del OGI a partir de SENT2_{set}.

Modelo	R ² ajustado (E)(OOB*)	Validación (R ² CV)	RMSE (CV*)
MLR	0.852	—	10.67
RF	0.658*	0.735	16.05*
SVR	0.986	0.767	13.83*

El análisis de importancia de variables en el modelo más robusto (SVR con WVIEW3_{set}) reveló que la FCC y el EVI_{mean} fueron los predictores más influyentes. Se observó una relación positiva entre la FCC y el OGI, lo que indica que los rodales con mayor madurez estructural mantienen una cobertura de copas elevada en el estrato superior. En cuanto a las métricas LiDAR, el modelo detectó que una menor curtosis (h_{kurt}) asociada a la presencia de múltiples estratos (mayor madurez) y valores reducidos de ARA3.TFR (proporción de retornos sobre 3 m) son determinantes para identificar el OGI.

El comportamiento de los residuos y las predicciones de los tres métodos se puede visualizar en la Figura 1.

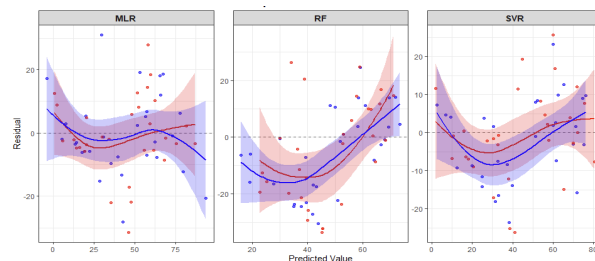


Figura 1. Comparativa de residuos frente a valores predichos de OGI para los modelos MLR, RF y SVR utilizando los datos de SENT2_{set} (rojo) y WVIEW3_{set} (azul).

Finalmente, se generó un mapa predictivo continuo del OGI (Figura 2) como producto cartográfico aplicado del modelo más robusto, a una resolución espacial de 50 m.

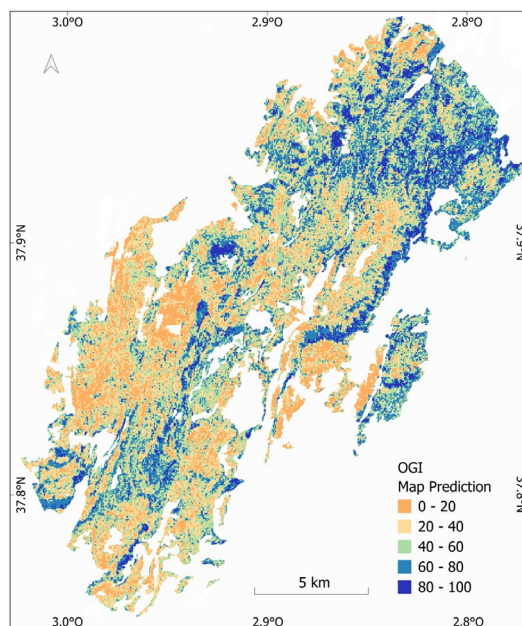


Figura 2. Mapa predictivo de OGI a través del modelo SVR con WVIEW3_{set}.

4. DISCUSIÓN

El modelo SVR con WorldView-3 mostró el mejor equilibrio entre ajuste y generalización (R^2 CV = 0.848; RMSE = 11.20), con una diferencia reducida respecto al entrenamiento ($\Delta R^2 = 0.055$), lo que sugiere ausencia de sobreajuste. Como sugieren Smola y Schölkopf (2004), la superioridad de SVR radica en su capacidad para manejar muestras moderadas y capturar dependencias no lineales, superando las rigideces del modelo lineal para describir rodales viejos altamente irregulares. Por su parte, RF mostró un rendimiento inferior (R^2 CV = 0.810; RMSE = 12.61) y mayor sesgo en los extremos del gradiente, tendencia a la convergencia hacia la media característica de los modelos bagging (Breiman, 2001).

El éxito general de estos modelos mejora sustancialmente el R^2 de 0.42 reportado por Hevia *et al.* (2022) con baja densidad LiDAR (0.5 pts/m²). Esta mejora no se atribuye únicamente a la mayor densidad del PNOA 2024 (>5 pts/m²), sino a la sinergia entre LiDAR y datos espectrales, ausente en el estudio previo. Este hallazgo coincide con Adiningrat *et al.* (2024), quienes demuestran que la combinación de LiDAR de alta densidad con datos ópticos es determinante para clasificar OGFs. Asimismo, la superioridad de WorldView-3 respalda la importancia de la alta resolución espacial para capturar patrones de claros, especialmente mediante índices de banda amarilla como GSI e YNDVI (Jackson & Adam, 2022).

Desde un punto de vista ecológico, la relación positiva entre FCC y OGI revela que los pinos centenarios desarrollan copas amplias que compensan los huecos del dosel, manteniendo una cobertura alta en el estrato superior. La importancia de *hkurt* (baja curtosis) refleja la multiestratificación propia de masas maduras no gestionadas, mientras que el coeficiente negativo de ARA3.TFR indica una estructura compleja donde el sotobosque reduce la señal del dosel superior, coincidiendo con Hevia *et al.* (2022) y la dinámica de huecos descrita por Rugani *et al.* (2013).

Aunque WorldView-3 ofrece mayor precisión (R^2 CV = 0.848; RMSE = 11.20), Sentinel-2 alcanza un rendimiento competitivo (R^2 CV = 0.767; RMSE = 13.83) con una diferencia de error absoluto de solo 2.63 unidades en la escala OGI. Su gratuidad y resolución temporal de 5 días lo posicionan como la herramienta más viable para el monitoreo a largo plazo requerido por políticas europeas.

5. CONCLUSIONES

La sinergia entre el ALS del PNOA 2024 y los sensores multispectrales permite realizar una cartografía precisa de los OGFs de *P. nigra* en la región mediterránea. El modelo SVR constituye la mejor aproximación estadística al abordar de manera más eficiente las relaciones no lineales entre las métricas analizadas y el grado de madurez del bosque. Se concluye que, aunque la alta resolución de WorldView-3 mejora el ajuste, Sentinel-2 ofrece una alternativa operativa robusta para la cartografía y el seguimiento temporal de estos OGFs requeridos por la Estrategia de la Biodiversidad de la UE para 2030.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2022-136906OB-C22 (MICIU/AEI/FEDER, UE). Agradecemos a los servicios forestales del P.N. de Cazorla por su apoyo técnico.

7. REFERENCIAS

- Adiningrat, D. P., Schlund, M., Skidmore, A. K., Abdullah, H., Wang, T., & Heurich, M. (2024). Mapping temperate old-growth forests in Central Europe using ALS and Sentinel-2A multispectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9), 826. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12993-5>
- Aragones, D., Rodriguez-Galiano, V.F., Caparros-Santiago, J.A., & Navarro-Cerrillo, R.M. (2019). Could land surface phenology be used to discriminate Mediterranean pine species? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.003>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Hevia, A., Calzado, A., Alejano, R., & Vázquez-Piqué, J. (2022). Identification of Old-Growth Mediterranean Forests Using Airborne Laser Scanning and Geostatistical Analysis. *Remote Sensing*, 14(16), 4040. <https://doi.org/10.3390/rs14164040>
- Jackson, C. M., & Adam, E. (2022). A machine learning approach to mapping canopy gaps in an indigenous tropical submontane forest using WorldView-3 multispectral satellite imagery. *Environmental Conservation*, *49*(4), 255-262. <https://doi.org/10.1017/S0376892922000339>
- Rugani, T., Diaci, J., & Hladnik, D. (2013). Gap dynamics and structure of two old-growth beech forest remnants in Slovenia. *PLoS ONE*, 8(1), e52641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052641>
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199-222. <https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88>
- Spies, T. A., & Franklin, J. F. (1991). The structure of natural young, mature, and old-growth Douglas-fir forests in Oregon and Washington. *En L. F. Ruggiero, K. B. Aubry, A. B. Carey, & M. H. Huff (Coords. téc.), Wildlife and vegetation of unmanaged Douglas-fir forests* (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-285, pp. 1-28). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Tíscar, P. A., & Lucas-Borja, M. E. (2016). Structure of old-growth and managed stands and growth of old trees in a Mediterranean *Pinus nigra* forest in southern Spain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 89(4), 393-401. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw002>