

Torralba, J.; Ruiz, L.; Crespo-Peremarch, P.; Simó-Martí, M.; Carbonell-Rivera, J. Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS

# Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS

Torralba, Jesús <sup>1</sup> Ruiz, Luis Á. <sup>1</sup> Crespo-Peremarch, Pablo <sup>1</sup> Simó-Martí, Marina <sup>1</sup>  
Carbonell-Rivera, Juan Pedro <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, València, España

<sup>2</sup> Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, 2424 Main Mall, University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá.

ORCID: Torralba [0000-0001-8644-8604](https://orcid.org/0000-0001-8644-8604) Ruiz [0000-0003-0073-7259](https://orcid.org/0000-0003-0073-7259) Crespo-Peremarch [0000-0003-2241-4493](https://orcid.org/0000-0003-2241-4493) Simó-Martí [0000-0001-9605-9645](https://orcid.org/0000-0001-9605-9645) Carbonell-Rivera [0000-0002-6724-6780](https://orcid.org/0000-0002-6724-6780)

Correspondencia: [jtorrpe@upv.es](mailto:jtorrpe@upv.es) [laruiz@cgf.upv.es](mailto:laruiz@cgf.upv.es) [pabcrepe@cgf.upv.es](mailto:pabcrepe@cgf.upv.es) [msimmar@upv.es](mailto:msimmar@upv.es)  
[jp.carbonellrivera@ubc.ca](mailto:jp.carbonellrivera@ubc.ca)

## RESUMEN

La continuidad vertical del combustible es un factor clave en la propagación de incendios forestales, especialmente en ecosistemas mediterráneos donde coexisten estratos arbustivos y arbóreos parcialmente solapados. Sin embargo, su caracterización sigue siendo compleja por su heterogeneidad. Este estudio analiza la continuidad vertical del combustible en 50 parcelas forestales mediante una metodología de descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura, derivados de nubes de puntos de escáner láser terrestre (TLS). La estructura vertical se evaluó jerárquicamente en cinco escalas espaciales, desde la parcela completa ( $\approx 113 \text{ m}^2$ ) hasta columnas de  $\approx 0,50 \text{ m}^2$ . Los resultados muestran que la descomposición gaussiana permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo, con un comportamiento que depende de la escala. Las métricas de ajuste indican que el desacople entre la referencia y las curvas gaussianas es mayor en escalas intermedias, mientras que la reducción del error en columnas muy pequeñas responde a una simplificación de la estructura observable asociada a un bajo número de puntos. Las escalas más amplias (parcela completa y primer nivel de subdivisión) muestran el comportamiento más estable.


**Palabras clave:** Incendios forestales, estructura forestal, combustible en escalera, escáner láser terrestre

Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 10 febrero 2026


# Análisis de la continuidad vertical del combustible forestal mediante descomposición gaussiana de nubes de puntos TLS

Torralba, Jesús <sup>(1)</sup>, Ruiz, Luis Á. <sup>(1)</sup>, Crespo-Peremarch, Pablo <sup>(1)</sup>, Simó-Martí, Marina <sup>(1)</sup>, Carbonell-Rivera, Juan Pedro <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, València, España.

 0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es ;  0000-0003-0073-7259, laruiz@cgf.upv.es  
 0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ;  0000-0001-9605-9645, msimmar@upv.es

<sup>(2)</sup> Integrated Remote Sensing Studio (IRSS), Department of Forest Resources Management, Forest Science Centre, University of British Columbia, Canadá.

 0000-0002-6724-6780, jp.carbonellrivera@ubc.ca.

**Resumen:** La continuidad vertical del combustible es un factor clave en la propagación de incendios forestales, especialmente en ecosistemas mediterráneos donde coexisten estratos arbustivos y arbóreos parcialmente solapados. Sin embargo, su caracterización sigue siendo compleja por su heterogeneidad. Este estudio analiza la continuidad vertical del combustible en 50 parcelas forestales mediante una metodología de descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura, derivados de nubes de puntos de escáner láser terrestre (TLS). La estructura vertical se evaluó jerárquicamente en cinco escalas espaciales, desde la parcela completa ( $\approx 113 \text{ m}^2$ ) hasta columnas de  $\approx 0,50 \text{ m}^2$ . Los resultados muestran que la descomposición gaussiana permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo, con un comportamiento que depende de la escala. Las métricas de ajuste indican que el desacople entre la referencia y las curvas gaussianas es mayor en escalas intermedias, mientras que la reducción del error en columnas muy pequeñas responde a una simplificación de la estructura observable asociada a un bajo número de puntos. Las escalas más amplias (parcela completa y primer nivel de subdivisión) muestran el comportamiento más estable.

**Palabras clave:** Incendios forestales, estructura forestal, combustible en escalera, escáner láser terrestre

## ***Analysis of vertical forest fuel continuity using Gaussian decomposition of TLS point clouds***

**Abstract:** Vertical forest fuel continuity is a key factor in wildfire propagation, particularly in Mediterranean ecosystems where shrub and tree strata partially overlap. However, characterizing it remains challenging due to its heterogeneity. This study analyzes vertical fuel continuity in 50 forest plots using a Gaussian decomposition methodology applied to height density profiles derived from terrestrial laser scanner (TLS) point clouds. Vertical structure was evaluated hierarchically across five spatial scales, ranging from the complete plot ( $\approx 113 \text{ m}^2$ ) to columns of  $\approx 0.50 \text{ m}^2$ . Results show that Gaussian decomposition captures the vertical transition between shrub and tree strata, although its performance depends on the scale. The goodness-of-fit metrics indicates that the mismatch between the reference data and the Gaussian curves is higher at intermediate scales, whereas the reduction in error observed in very small columns reflects a simplification of the observable structure due to a very low number of points. The coarser scales (the complete plot and the first level of spatial subdivision) show the most stable behavior.

**Keywords:** Forest wildfires, forest structure, ladder fuels, terrestrial laser scanner

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques mediterráneos actuales presentan una elevada carga de combustible distribuida en distintos estratos verticales, lo que incrementa la probabilidad de incendios de alta intensidad, especialmente cuando

existe continuidad vertical entre el estrato arbustivo y el dosel arbóreo. En este contexto, la caracterización de la estructura vertical del combustible es clave para la gestión forestal y la prevención de incendios (Marino *et al.*, 2018). Sin embargo, describir la continuidad vertical

y, en particular, la conectividad entre el sotobosque y el dosel sigue siendo un reto metodológico, debido a la complejidad de los perfiles y a la elevada heterogeneidad espacial (Martin-Ducup *et al.*, 2025; Torralba *et al.*, 2024). Actualmente, el uso de cartografía de modelos de combustible, un conjunto de clases que representan diferentes grados de complejidad de la estructura vertical y de la densidad de combustible, suple esta falta de información cuantitativa necesaria para el mantenimiento preventivo de los bosques. Sin embargo, la creciente disponibilidad de datos y de metodologías de procesamiento debería permitir un cambio de paradigma y una tendencia hacia una caracterización más detallada de la estructura vertical.

Los sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) han demostrado una elevada capacidad para caracterizar la estructura vertical del bosque, aunque la identificación y cuantificación de estratos que actúan como combustibles de escalera continúa siendo un desafío metodológico (Martin-Ducup *et al.*, 2025; Viedma & Moreno, 2025). En este contexto, el escáner láser terrestre (TLS) proporciona perfiles verticales de alta densidad de puntos que permiten analizar la distribución de la vegetación mediante enfoques basados en la densidad de puntos por altura. Sin embargo, extraer métricas objetivas y comparables de continuidad vertical a partir de estos perfiles complejos no es un proceso directo. La descomposición gaussiana de perfiles de altura se ha propuesto como una vía automatizable para representar la estructura vertical mediante curvas gaussianas con significado estructural (Torralba *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2017), facilitando la identificación de estratos verticales y la cuantificación de su solape.

Este trabajo plantea una metodología de análisis de la continuidad vertical del combustible mediante la descomposición gaussiana aplicada a perfiles de distribución de retornos en altura de nubes de puntos de TLS, con dos objetivos: (i) analizar la viabilidad de caracterizar la continuidad vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo a múltiples escalas espaciales; y (ii) evaluar la coherencia de la descomposición gaussiana para reproducir la organización vertical del combustible.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en los bosques mediterráneos del Parque Natural de la Sierra de Espadán (España), caracterizados por masas forestales mayoritariamente coetáneas y por una elevada variabilidad en la densidad arbórea y la fracción de cabida cubierta. El estrato arbóreo está dominado por un fustal bajo a medio de *Pinus halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton con pies dispersos codominantes de *Quercus suber* L. y *Q. ilex* L. que rara vez forman bosquetes. El sotobosque presenta una cobertura de rala a densa, con una gran diversidad de especies, donde destacan *Salvia rosmarinus* Spenn., *Genista scorpius* (L.) DC., *Cistus albidus* L. y *Pistacia lentiscus* L. (Torralba *et al.*, 2024).

Se registraron las mismas 25 parcelas circulares de 6 metros de radio (113 m<sup>2</sup>) en 2015 y en 2022. La organización vertical del combustible mostró una clara dependencia de la composición del estrato arbóreo

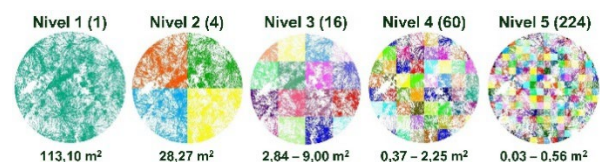
dominante, con alturas medias de la base de copa (CBH) más bajas en parcelas dominadas por *P. halepensis* (2,93 ± 1,95 m) y más elevadas en parcelas dominadas por *P. pinaster* (6,92 ± 2,51 m), mientras que en parcelas mixtas con *Q. suber* la CBH fue menor (2,18 ± 1,17 m). En el estrato arbustivo, la altura máxima varió entre 0,52 y 4,15 m, lo que refleja una elevada heterogeneidad estructural. Las 50 parcelas se consideraron unidades de análisis independientes.

### 2.1. Registro y procesado de datos TLS

Los datos TLS se registraron en 2015 y 2022 mediante un escáner láser de fase Faro Focus 3D 120. En cada parcela se realizaron cinco estaciones de escaneo, una central y cuatro adicionales situadas a 7,5 m en las direcciones cardinales. En cada nube de puntos, se eliminaron de forma supervisada los puntos anómalos y el ruido. El registro entre escaneos se realizó mediante esferas de referencia. Posteriormente, las nubes de puntos se clasificaron en puntos de suelo y de vegetación. Los puntos de suelo se interpolaron para generar un modelo digital del terreno, que se empleó para la normalización de las alturas de la nube de puntos. Finalmente se eliminaron los puntos correspondientes a los troncos de los árboles para evitar la sobreestimación de la continuidad vertical del combustible.

### 2.2. Extracción de curvas gaussianas

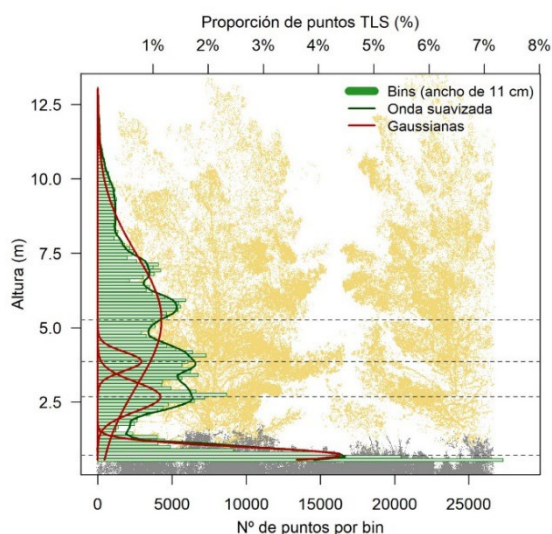
El análisis de la estructura vertical se realizó de forma jerárquica en cinco escalas espaciales. El Nivel 1 correspondió a la parcela completa (113 m<sup>2</sup>), mientras que los niveles sucesivos se obtuvieron mediante subdivisiones espaciales progresivas hasta generar columnas de análisis de menor tamaño, alcanzando en el Nivel 5 superficies de aproximadamente 0,56 m<sup>2</sup> (Fig. 1). En los niveles 3, 4 y 5 se descartaron columnas con superficies muy reducidas para garantizar la representatividad estructural de los perfiles analizados.



**Figura 1.** Escalas espaciales de análisis para la extracción de curvas gaussianas. Entre paréntesis se indica el número de subdivisiones en cada nivel. Los colores son aleatorios.

Se construyeron histogramas de la distribución de alturas normalizadas, descartando los puntos por debajo de 0,5 m para evitar la inclusión de puntos del suelo y del estrato herbáceo. El ancho de los *bins* se determinó mediante el algoritmo bayesiano optBINS y se homogeneizó por nivel. Los histogramas se transformaron en curvas continuas y se suavizaron mediante un filtro de Savitzky-Golay (polinomio de orden 2; ventana de 9). Sobre las curvas suavizadas se aplicó un proceso automatizado de descomposición gaussiana basado en Zhou *et al.* (2017), ajustando combinaciones de funciones gaussianas a los picos detectados en el perfil vertical. Para cada gaussiana se estimaron sus parámetros principales (amplitud, media ( $\mu$ ) y desviación estándar), que se utilizaron como descriptores cuantitativos de la estructura vertical. El proceso se

ejecutó de forma iterativa para cada columna y nivel de análisis, con un máximo de cuatro curvas en función de la complejidad estructural del perfil (Fig. 2). La descomposición se realizó secuencialmente entre niveles, acotando el rango vertical de ajuste a partir de la información heredada del nivel inmediatamente superior para mantener la coherencia jerárquica entre escalas. A partir de las curvas gaussianas se derivaron métricas orientadas a la caracterización de la continuidad vertical del combustible. En este trabajo se presentan únicamente los resultados de la métrica OVLtree, que cuantifica la fracción del área de la gaussiana arbórea que se solapa verticalmente con la gaussiana arbustiva respecto al área total de la gaussiana arbórea, como descriptor del grado de solape vertical entre estratos.



**Figura 2.** Curvas gaussianas ajustadas en el Nivel 1. El fondo en beige y gris representa los estratos arbóreo y arbustivo, respectivamente. Se muestran el histograma de alturas en verde claro (*bins*), la onda suavizada en verde oscuro y las curvas gaussianas en rojo burdeos. Las líneas discontinuas representan la altura media de cada gaussiana.

### 2.3. Validación y evaluación

Se segmentaron manualmente las 50 parcelas en estrato arbóreo y estrato arbustivo. Cada estrato se subdividió en columnas (niveles 1 a 5) y en bins de altura, siguiendo el mismo esquema descrito en la Sección 2.2. Esta segmentación permitió obtener la distribución vertical observada de los puntos en cada bin y estrato.

La validación se basó en comparar el solape vertical observado entre estratos con el solape modelizado mediante la descomposición gaussiana. El solape observado se cuantificó a escala de bins, identificando intervalos de altura compartidos por ambos estratos y resumiéndolos mediante el número de bins solapados y las proporciones relativas de puntos en cada estrato. En paralelo, la descomposición gaussiana permitió estimar, para pares de curvas adyacentes, el punto de intersección y el área de solape entre ellas. La coherencia entre ambas representaciones para una parcela o columna se evaluó mediante el error cuadrático medio (MSE), definido como:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (P_{ij} - A_{ij})^2 \quad (1)$$

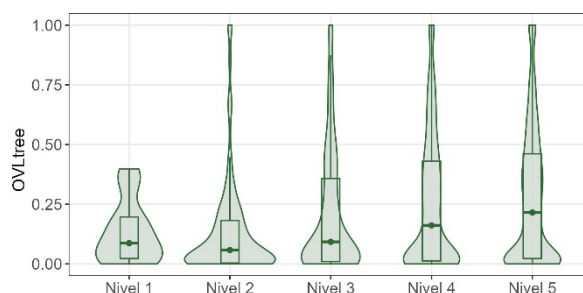
$$P_{ij} = \frac{(P_{\text{árbol}} - P_{\text{matorral}})}{P_{\text{árbol}}} \quad (2)$$

$$A_{ij} = \frac{(A_{\text{árbol}} - A_{\text{matorral}})}{A_{\text{árbol}}} \quad (3)$$

donde  $N$  es el número de *bins*,  $P_{ij}$  representa la dominancia relativa del estrato arbóreo derivada de los puntos observados, y  $A_{ij}$  su equivalente estimado a partir del área de las curvas gaussianas en cada *bin*. El MSE constituye el principal indicador del desacople vertical entre la estructura observada y la representada por la descomposición gaussiana. De forma complementaria, se calculó la correlación de *Pearson* entre las series  $P_{ij}$  y  $A_{ij}$  evaluadas en los  $N$  *bins* de altura, como medida de concordancia de la forma del perfil vertical.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

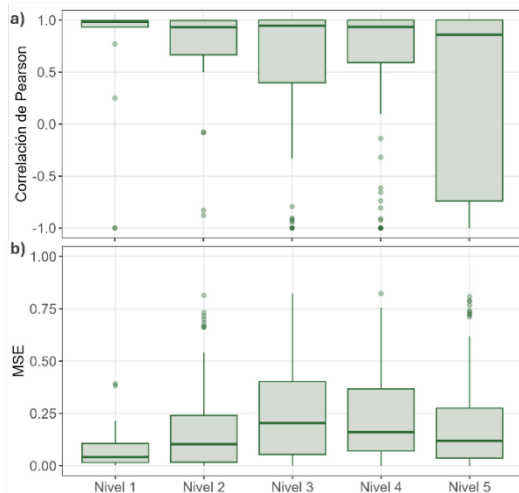
La Figura 3 muestra la distribución de la métrica OVLtree para los cinco niveles de análisis. Se observa un incremento progresivo de los valores de solape vertical desde el Nivel 1 (parcela completa) hasta los niveles definidos por columnas de menor superficie, lo que refleja el efecto de la agregación espacial en la estimación del solape vertical. Al analizar la parcela completa, la transición vertical entre estratos queda parcialmente promediada, mientras que el análisis por columnas de menor área permite detectar con mayor detalle la conexión vertical entre estratos. La elevada dispersión de los valores de OVLtree en todos los niveles refleja una marcada heterogeneidad vertical, con la coexistencia de columnas con solape reducido y otras con solape elevado, asociadas a una fuerte continuidad vertical del combustible.



**Figura 3.** Distribución de OVLtree por nivel de análisis, que cuantifica el solape vertical entre los estratos arbóreo y arbustivo (0 = solape reducido; 1 = solape elevado).

La capacidad de la descomposición gaussiana para reproducir la estructura vertical observada se evaluó mediante la correlación de *Pearson* entre  $P_{ij}$  y  $A_{ij}$  a lo largo de los  $N$  *bins* de altura (Fig. 4.a). En general, se obtuvieron correlaciones elevadas en los niveles 1 y 2, lo que indica que la descomposición gaussiana captura de manera consistente el patrón vertical de la transición entre estratos. En los niveles definidos por columnas de menor superficie, aumenta la dispersión de los valores y aparecen correlaciones más bajas, e incluso negativas, asociadas principalmente a perfiles con un número reducido de puntos y una distribución irregular de

puntos, lo que refleja limitaciones conocidas asociadas a la menor densidad de puntos en este tipo de análisis (Viedma & Moreno, 2025). Estas discrepancias entre la referencia y la descomposición gaussiana no responden a un fallo sistemático de la metodología, sino a la dificultad de representar, mediante curvas gaussianas bien diferenciadas, perfiles verticales muy irregulares o complejos, como suele ocurrir en los niveles 4 y 5.



**Figura 4.** a) Distribución de la correlación de Pearson entre  $P_{ij}$  y  $A_{ij}$ , por nivel de análisis. b) Distribución del error cuadrático medio (MSE) por nivel de análisis.

El rendimiento global de la metodología, en términos de la magnitud de los residuos, se sintetiza mediante el MSE (Fig. 4.b). En el nivel 1, donde hay muchos puntos, la estructura real es muy compleja con colas largas y asimétricas. En este caso, la gaussiana se ajusta bien en general. El error aumenta progresivamente en los niveles 2 y 3 y, posteriormente, disminuye ligeramente en los niveles 4 y 5. Este patrón indica que el mayor desacople se produce en escalas en las que la estructura vertical está suficientemente bien muestreada, lo que permite que las discrepancias entre la referencia y la aproximación gaussiana sean visibles y cuantificables. La reducción del MSE en los niveles 4 y 5 no implica una mejor representación de la estructura vertical, sino un empobrecimiento de la estructura observable en columnas con pocos puntos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Viedma & Moreno (2025) con LiDAR aéreo de baja densidad. En consecuencia, las métricas de error deben interpretarse junto con las métricas estructurales, ya que valores bajos de error no garantizan, por sí solos, una representación más fiel de la señal vertical asociada a la interacción entre estratos, cuya caracterización sigue siendo compleja en ecosistemas estructuralmente continuos (Marino *et al.*, 2018).

#### 4. CONCLUSIONES

La descomposición gaussiana aplicada a nubes de puntos TLS permite representar la transición vertical entre los estratos arbustivo y arbóreo como indicador de la continuidad vertical. Los resultados muestran un comportamiento claramente dependiente de la escala de análisis: en niveles de mayor superficie, la

descomposición gaussiana reproduce adecuadamente la estructura vertical, mientras que en niveles de menor superficie aumenta la variabilidad debido a la fragmentación y a la irregularidad en la distribución de los puntos. En este sentido, las escalas más amplias (la parcela completa y el primer nivel de subdivisión) se consideran las más adecuadas, al ofrecer un equilibrio entre estabilidad y capacidad de representación de la estructura. Asimismo, la evaluación de la continuidad vertical del combustible no puede basarse únicamente en métricas de error, ya que valores bajos de MSE pueden coexistir con representaciones estructuralmente simplificadas asociadas a un número reducido de puntos. Este enfoque contribuye a una mejor comprensión de la continuidad vertical del combustible forestal, relevante para la gestión de los bosques y la prevención de los incendios forestales.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo recogido en esta publicación forma parte de las ayudas PID2020-117808RB-C21 y PID2024-158591OB-I00, financiadas por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

#### 6. REFERENCIAS

- Marino, E., Montes, F., Tomé, J. L., Navarro, J. A., & Hernando, C. (2018). Vertical forest structure analysis for wildfire prevention: Comparing airborne laser scanning data and stereoscopic hemispherical images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 438–449. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.07.015>
- Martin-Ducup, O., Dupuy, J. L., Soma, M., Guerra-Hernandez, J., Marino, E., Fernandes, P. M., Just, A., Corbera, J., Toutchkov, M., Sorribas, C., Bock, J., Piboule, A., Pirotti, F., & Pimont, F. (2025). Unlocking the potential of Airborne LiDAR for direct assessment of fuel bulk density and load distributions for wildfire hazard mapping. *Agricultural and Forest Meteorology*, 362, 110341. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2024.110341>
- Torralba, J., Crespo-Peremarch, P., Ruiz, L. Á., & Carbonell-Rivera, J. P. (2024). Análisis multitemporal de la estructura vertical de ecosistemas forestales mediterráneos mediante datos TLS. *Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades Para Un Crecimiento Azul. XX Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 291–294. <http://www.aet.org.es/?q=congresos>
- Viedma, O., & Moreno, J. M. (2025). Impact of LiDAR pulse density on forest fuels metrics derived using LadderFuelsR. *Ecological Informatics*, 88(1), 103135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103135>
- Zhou, T., Popescu, S. C., Krause, K., Sheridan, R. D., & Putman, E. (2017). Gold – A novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129, 131–150. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2017.04.021>