

Análisis multitemporal de la estructura vertical de ecosistemas forestales mediterráneos mediante datos TLS

Jesús Torralba, Pablo Crespo-Peremarch, Luis Á. Ruiz, Juan Pedro Carbonell-Rivera

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España. jectorpe@upv.es, pabcrepe@cgf.upv.es, laruiz@upv.es, juacarri@upv.es

Resumen: La capacidad para cuantificar y monitorear la dinámica del matorral, y especialmente la conectividad entre el estrato arbustivo y el estrato arbóreo, juega un papel clave en el estudio de la propagación de los incendios forestales. La conectividad entre estratos forestales es difícil de medir en los bosques mediterráneos debido a la complejidad que conlleva y los recursos que implica. El presente estudio propone un método para identificar los estratos arbustivo y arbóreo y cuantificar los cambios en la conectividad entre estratos a partir de datos de escáner láser terrestre (TLS). El método consiste en dividir las nubes de puntos TLS en columnas de datos, extraer los perfiles de distribución de retornos en altura y aplicar descomposición gaussiana para analizar la evolución de la conectividad entre estratos entre 2015 y 2022. Los resultados muestran que el estrato arbóreo de *Pinus pinaster* tiene una conectividad menor con el estrato arbustivo en comparación con el estrato arbóreo de *P. halepensis*. Los resultados también muestran el efecto de la poda natural de estas dos especies arbóreas, y en consecuencia la reducción de material combustible en los fustes a lo largo del tiempo. En términos generales, el matorral redujo la superficie ocupada y su altura, por lo que la conectividad entre estratos se redujo con el tiempo. Los resultados en el estrato arbóreo son probablemente consecuencia del efecto del crecimiento de los árboles en ausencia de tratamientos silvícolas, y la variación negativa del matorral probablemente esté relacionada con la climatología del periodo de tiempo analizado. Este enfoque nos permite profundizar en la comprensión de la dinámica vertical del bosque mediterráneo, discernir de manera efectiva entre los estratos arbustivos y arbóreos, y cuantificar el cambio de la estructura, elementos clave en la gestión silvícola y en la prevención de los incendios forestales.

Palabras clave: nubes de puntos, descomposición gaussiana, incendios forestales, matorral mediterráneo, estructura forestal, sotobosque.

Multitemporal analysis of the vertical structure of Mediterranean forest ecosystems using TLS data

Abstract: *The potential to quantify and monitor understory dynamics, especially the connectivity between the understory and the overstory strata, plays a key role in the study of the spread of wildfires. The connectivity between forest strata is challenging to measure in Mediterranean forests due to the complexity and resources involved. The present study proposes a method to identify the understory and overstory strata and to quantify changes in connectivity between the strata from terrestrial laser scanner (TLS) data. The method consists of dividing TLS point clouds into columns of data, extracting height return distribution profiles and applying Gaussian decomposition to analyze the evolution of connectivity between strata in the period from 2015 to 2022. Results show that the Pinus pinaster has a lower connectivity with the understory compared to the P. halepensis. In addition, it is shown the effect of self-pruning and, consequently, the reduction of fuel material in the stems over time. In general terms, the shrub cover and its height decreased, reducing connectivity between strata over time. Results observed in the overstory stratum are probably a consequence of the effect of tree growth without silvicultural treatment, and the negative variation in the understory is probably related to the climatology of the period analyzed. This approach allows us to deepen our understanding of the vertical dynamics of the Mediterranean forest, effectively discern between understory and overstory strata, and quantify the change in structure, key elements in silvicultural management, and forest wildfire prevention.*

Keywords: *point clouds, Gaussian decomposition, forest wildfires, Mediterranean shrub, forest structure, understory vegetation*

1. INTRODUCCIÓN

El fuego es un componente natural en la regeneración de los ecosistemas mediterráneos. Sin embargo, el progresivo abandono de las zonas rurales, la intensificación de la estacionalidad del clima mediterráneo y la acumulación del combustible vegetal en los bosques está generando incendios forestales cada vez más intensos, severos y recurrentes, llevando al límite la capacidad de resiliencia de los bosques. En este escenario, la diversidad estructural de los rodales forestales y la alta carga de combustible en los estratos inferiores, condicionan la propagación de

los incendios y convierten a los bosques mediterráneos en zonas altamente inflamables.

La capacidad para cuantificar y monitorear la dinámica del matorral, y especialmente la conectividad entre el sotobosque y las copas de los árboles, es fundamental para comprender los patrones y las tendencias asociadas con la propagación de incendios. Los métodos manuales para medir la relación entre el matorral y los elementos del dosel son complejos e imperfectos. En contrapartida, los métodos indirectos de medición de la estructura vertical de la vegetación basados en LiDAR (*Light Detection and Ranging*) permiten estimar variables como el índice de

área foliar (LAI, *Leaf Area Index*), el índice de área vegetal o la cubierta del dosel, así como caracterizar la estructura vertical o la vegetación del sotobosque (Lefsky et al., 2002; Wulder et al., 2012; Crespo-Peremarch et al., 2018).

El uso del láser escáner terrestre (TLS, por sus siglas en inglés) en entornos forestales ha permitido registrar con alto nivel de detalle la estructura tridimensional de los ecosistemas. A partir de las nubes de puntos generadas mediante TLS pueden extraerse métricas silvícolas a nivel de individuo (diámetro a la altura del pecho, altura, volumen, biomasa, etc.) y a nivel de parcela, permitiendo caracterizar la estructura forestal. En este sentido, el análisis de la estructura vertical en nubes de puntos TLS puede ayudar a discernir la frontera entre el matorral y dosel arbóreo. En la búsqueda de técnicas que puedan aplicarse al análisis de la estructura vertical, es de especial interés la descomposición gaussiana. Esta técnica es utilizada en el procesamiento de ondas para su descomposición en función de la densidad de probabilidad gaussiana, y ha sido aplicada para analizar el cierre de copas en nubes de puntos TLS (Danson et al. 2007).

En este trabajo exploramos la capacidad del TLS para caracterizar la conectividad entre el estrato arbustivo y el dosel arbóreo en cuatro escenarios de bosque mediterráneo. La conectividad de los estratos forestales en estos ecosistemas es una variable crítica en la propagación de los incendios forestales, y su dinámica está influida por el clima local y las prácticas silvícolas. Primero analizamos la diferenciación entre el estrato arbustivo y el estrato arbóreo mediante la aplicación de una descomposición gaussiana de los perfiles de densidad de las nubes de puntos TLS. En segundo lugar, analizamos la evolución de la conectividad entre estratos en dos momentos temporales separados por un intervalo de 7 años. Esta metodología sirve de base para poder cartografiar y caracterizar la dinámica vertical del bosque mediterráneo, de gran interés en la previsión de los incendios forestales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en los bosques del Parque Natural de la Sierra de Espadán en la provincia de Castellón, España. Se caracteriza por masas forestales heterogéneas, principalmente coetáneas, donde las especies arbóreas dominantes son *Pinus halepensis* Mill. y *P. pinaster* Aiton, con presencia ocasional de *Quercus suber* L. y *Q. ilex* L. La variabilidad en la densidad y en la espesura de la cubierta del arbolado ha dado como resultado grandes diferencias en la distribución, densidad y diversidad de especies de matorral, donde predominan especies como *Genista scorpius* (L.) DC., *Cistus albidus* L., *Salvia rosmarinus* Schleid., *Pistacia lentiscus* L., *Quercus coccifera* L., *Calicotome* sp., *Lavandula stoechas* L., *Daphne gnidium* L., y *Ruscus aculeatus* L.

Se registraron 25 parcelas circulares de 6 m de radio (113 m²) en los años 2015 y 2022. En este estudio se ha trabajado únicamente con 4 parcelas con diferente continuidad vertical para facilitar el análisis (Figura 1). Las parcelas elegidas son: P1) continuidad vertical muy baja dominada por *P. pinaster* con la altura de la base de la copa alta (8.76 ± 1.66 m), fustes limpios de ramas bajas

y muy poco matorral con una altura máxima media de 0.87 ± 0.28 m; P2) continuidad vertical media baja, parcela dominada por individuos de *P. pinaster* con fustes con algunas ramas bajas cuya base de la copa media es de 6.54 ± 1.35 metros, presentando el matorral una altura inferior a un metro; P3) continuidad vertical media alta, parcela dominada por individuos de *P. pinaster* y *P. halepensis* con fustes con ramas bajas cuya base de la copa es de 4.71 ± 1.27 metros de media, teniendo el matorral una altura máxima superior a un metro; y P4) continuidad alta, parcela dominada por *P. halepensis*, fustes con gran cantidad de ramas bajas con una altura media de 1.70 ± 0.5 m, presencia de árboles dominados y matorral con altura superior a 1.5 metros.

2.1. Adquisición y procesamiento de datos TLS

Los datos TLS fueron adquiridos en los años 2015 y 2022 con un escáner Faro Focus 3D 120, con un rango operacional de 0.6 a 120 m, precisión de ± 2 mm a 25 m, frecuencia de pulso de 97 Hz, ángulo de escaneo horizontal de 300° y vertical de 360°, longitud de onda de 905 nm y divergencia del haz de 0.19 rad. Para minimizar la oclusión y recopilar la variabilidad estructural de las parcelas, en cada parcela se estacionó el escáner en 5 posiciones, una posición central y 4 posiciones a 7.5 metros en los puntos cardinales. Tanto las posiciones del escáner como la configuración de adquisición se mantuvieron en los dos años de estudio para poder hacer comparables las nubes de puntos. En cada parcela se posicionaron al menos cinco objetivos esféricos que se georreferenciaron mediante mediciones topográficas clásicas. Posteriormente, las nubes de puntos TLS se registraron con una precisión media de 0.052 m y se georreferenciaron con una precisión media de 0.252 m en el software Trimble RealWorks© v10.4. La densidad media de puntos por parcela para los dos años fue de 15.446 puntos·m⁻².

En las nubes de puntos se identificaron los puntos del suelo empleando el programa LAStools® (versión 230212), a partir de los cuales se generó el modelo digital del terreno (MDT). Posteriormente, el MDT se empleó en la normalización de las alturas de la nube de puntos. Las nubes de puntos TLS normalizadas se ajustaron a la misma posición utilizando CloudCompare® (herramientas de alineación y rotación).

2.2. Análisis de perfiles verticales y descomposición gaussiana

Dada la magnitud del conjunto de datos, se optó por emplear columnas de puntos como unidad de agrupación para los retornos del TLS. El tamaño de la columna de puntos se determina por el usuario y está condicionado por la densidad de los datos, así como el nivel de detalle requerido (Crespo-Peremarch et al., 2018). En este estudio, se seleccionó un tamaño de columna de 0.25 m² de base y una altura equivalente a la altura máxima de dicha columna, basándonos en el espaciamiento de las muestras. La X, Y, Z mínimas de cada columna de puntos fueron determinadas para iniciar desde un punto común la segmentación en columnas en ambas fechas, facilitando así

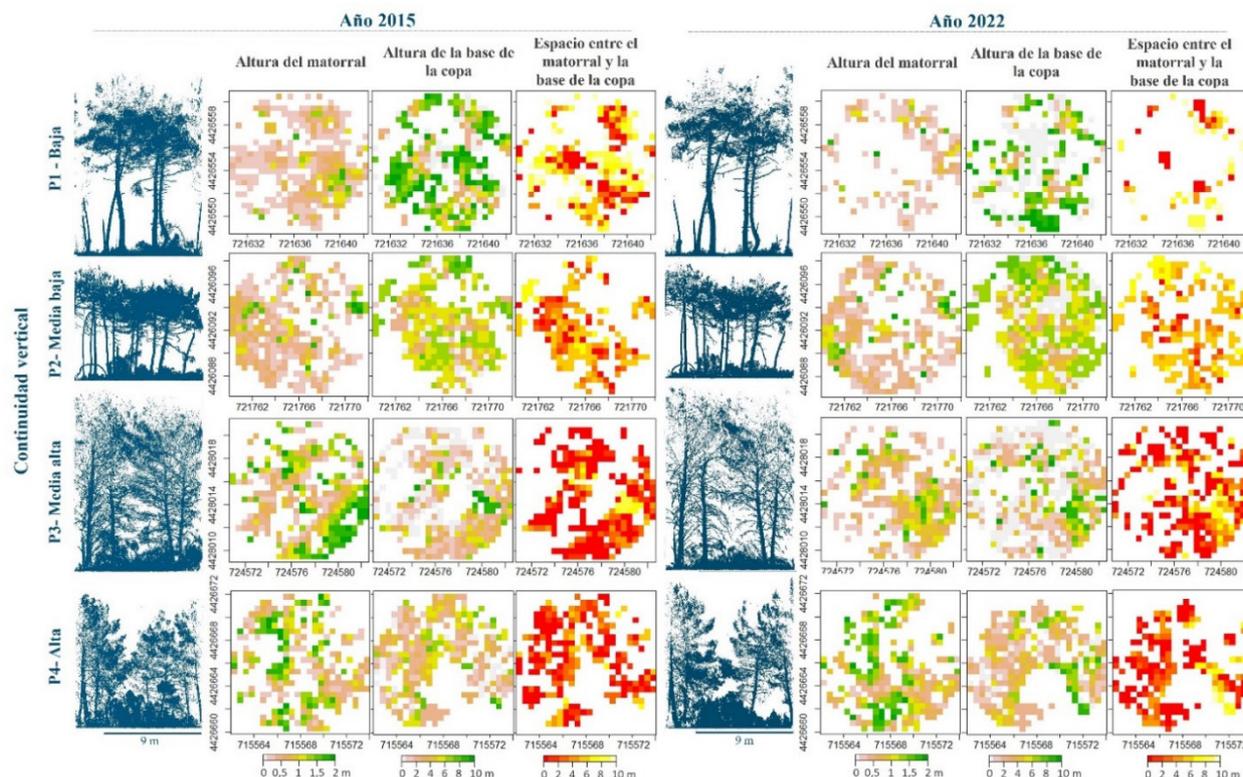


Figura 1. Variación de la continuidad vertical a lo largo de 7 años en 4 parcelas circulares de bosque mediterráneo. De izquierda a derecha se representa el perfil de la nube de puntos TLS y representaciones cenitales de: la altura máxima que alcanza el estrato de matorral, la altura de la base del estrato arbóreo y la diferencia entre ambos estratos para una columna de puntos de $0,25 \text{ m}^2$ de base. Esta secuencia de sub-figuras se repite para el año 2015 y 2022. El color blanco representa ausencia de vegetación.

la comparación entre columnas de puntos. A partir de cada columna de puntos se generaron perfiles verticales de la distribución de puntos.

Con el objetivo de automatizar la diferenciación entre el estrato arbustivo y el estrato arbóreo en el análisis de la distribución vertical de puntos, se aplicó la descomposición gaussiana de la curva de densidad de puntos. La configuración de dicha curva se llevó a cabo mediante la extracción máxima de tres curvas gaussianas, cada una de ellas caracterizada por la media, la desviación estándar, y los límites superior e inferior, determinados por la horizontal de corte que define el área de la función gaussiana aproximadamente al 95%. A continuación, se evaluó la posible superposición de las curvas gaussianas adyacentes en una misma columna de puntos. En caso de solapamiento, se determinó el punto de intersección entre ambas curvas y se ajustaron en consecuencia los límites de la curva a dicho punto de intersección.

Al disponer de tres curvas gaussianas fue necesario establecer una serie de criterios para determinar con qué estrato vertical estaba relacionada cada curva. Se estableció que la altura máxima del matorral se aproxima a los 2 metros. De manera que, para identificar el estrato arbustivo, se seleccionaron todas aquellas curvas con una media inferior a los dos metros y con un límite superior por encima de los 15 cm, con el fin de descartar curvas que representasen únicamente el terreno. De entre las posibles curvas candidatas se seleccionó aquella con una mayor media, es decir, altura, y se extrajo su límite superior para

poder estudiar la continuidad vertical con el estrato arbóreo. En cuanto a este estrato, se determinó que las curvas cuyas medias estuviesen por encima de los 2 metros se considerarían como representativas de dicho estrato. De todas estas curvas, se seleccionó aquella con la menor media, y de ella se extrajo el límite inferior que indicaba la base del dosel arbóreo.

Una vez estimados los límites superior e inferior para el matorral y el dosel arbóreo, respectivamente, se calculó la diferencia entre ambos estratos para determinar la conectividad entre ellos. Este procedimiento se repitió para los dos años de estudio. Finalmente, se comparó la evolución de la conectividad entre los estratos forestales en las cuatro parcelas analizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descomposición gaussiana permitió discriminar entre estratos en el interior de la parcela. En la Figura 1 se muestra para cada parcela y cada año de estudio, la altura máxima del estrato arbustivo, la altura mínima del estrato arbóreo y la variación de la distancia entre estratos a nivel de columna vertical, es decir, cada $0,25 \text{ m}^2$. Se puede observar que el espacio entre el matorral y la base de la copa de los árboles es mayor en las parcelas dominadas por *P. pinaster* (P1 y P2) en comparación con el hueco en las parcelas de *P. halepensis* y mixta (P3 y P4).

Respecto al estrato arbustivo se observó que en 2022 hay una disminución de la ocupación del matorral en la P1 (33.8%) y P2 (15.47%), manteniéndose prácticamente

invariable en las parcelas P3 y P4. La altura máxima media del matorral a nivel de parcela no experimentó cambios significativos entre las fechas de análisis, excepto en la P3, donde se registró una disminución de 0.5 m (Tabla 1). Por otro lado, el estrato arbóreo mostró variaciones más sutiles en la ocupación de la copa a nivel parcela, con aumentos del 6.4% y 7.3% en P2 y P3, respectivamente. La altura de la base de la copa de los árboles a nivel de la parcela aumentó por encima de un metro en P1 y P3, y menos de 0.5 m en P2 y P4 (Tabla 1). El espacio entre ambos estratos aumentó entre 2015 y 2022 en todas las parcelas, especialmente en P1, 1.5 m, debido principalmente a la desaparición de parte del matorral en 2022 y al aumento de la base de la copa como resultado del crecimiento de los árboles. En P3, el espacio entre estratos aumentó en 1.61 m, atribuible a la pérdida de altura del matorral y a la poda natural de *P. halepensis*, que resultó en la pérdida de ramas bajas de los árboles.

La altura de la base de la copa de los árboles aumentó en siete años en todas las parcelas principalmente por el crecimiento natural del árbol y por la pérdida de las ramas bajas secas que permanecen en el árbol hasta su eventual caída por el viento, la nieve o algún agente biótico. En ninguna parcela aparecieron nuevos árboles que disminuyesen la altura de la base de la copa. El matorral disminuyó su superficie ocupada, es decir, es probable que los arbustos más pequeños influenciados por la climatología del periodo analizado desaparecieran, manteniéndose los arbustos más altos. La media de las máximas de la altura se ha mantenido en el periodo de análisis, mientras que la altura máxima del matorral también se ha reducido en el periodo de estudio.

Tabla 1. Altura (H) media y desviación típica (σ), mínima (min.), máxima (máx.), y diferencia entre 2022 y 2015 (Dif. 22-15) en las obtenidas para cada estrato y para el espacio entre ambos a nivel parcela.

Parcela	Altura del estrato arbustivo						
	2015		2022		Dif. 22-15		
	H min.	H máx.	H min.	H máx.			
P1	0.57±0.59	-	4.74	0.58±0.65	-	3.49	0.01
P2	0.65±0.56	-	3.13	0.67±0.55	-	2.85	0.02
P3	1.32±0.91	-	3.99	0.85±0.68	-	3.96	-0.46
P4	1.18±0.80	-	4.37	1.23±0.69	-	3.96	0.05

Parcela	Altura del estrato arbóreo						
	H min.	H máx.	H min.	H máx.	Dif. 22-15		
	P1	8.27±2.91	1.07	12.90		9.42±3.14	0.54
P2	5.28±1.77	0.48	9.17	5.72±1.55	0.88	9.21	0.45
P3	3.35±2.69	0.31	11.49	4.68±3.96	0.30	14.99	1.33
P4	3.35±2.00	0.21	8.71	3.56±2.20	0.22	10.19	0.21

Parcela	Espacio entre el matorral y la base de la copa						
	H min.	H máx.	H min.	H máx.	Dif. 22-15		
	P1	7.92±2.82	0.70	12.43		9.43±2.81	0.56
P2	4.67±1.66	0.37	7.87	5.36±1.39	0.51	9.00	0.68
P3	1.85±2.71	0.00	10.06	3.46±4.03	0.00	14.45	1.61
P4	1.96±2.07	0.00	7.84	2.13±2.54	0.00	9.57	0.17

Un punto importante que no se ha tratado en este trabajo es la validación de las alturas de los estratos. Aunque existen estudios como el de Crespo-Peremarch *et al.* (2018) en el que se consideran los datos adquiridos con TLS como datos de referencia, en futuros trabajos se explorará la validación de las alturas de los diferentes estratos a partir de datos manuales adquiridos en campo. La metodología propuesta podrá ser aplicada en el futuro a datos obtenidos mediante láser escáner móvil, de modo que se pueda aumentar la frecuencia de adquisición y la cobertura espacial.

4. CONCLUSIONES

El método propuesto permite analizar la variación multitemporal de la estructura vertical utilizando datos TLS. La aplicación de la descomposición gaussiana ha permitido discriminar de manera eficiente el estrato arbustivo del estrato arbóreo, posibilitando la cuantificación de las variaciones en la conectividad entre estos estratos a lo largo de un periodo de siete años. Los resultados para el periodo mostraron un incremento de forma natural de la altura de la base de la copa y una disminución de la ocupación y altura del matorral, es decir, sin tratamientos silvícolas. Probablemente, la ausencia de regeneración natural y la climatología propia del periodo de tiempo analizado hayan provocado la disminución de la carga de combustible, haciendo estos rodales forestales menos inflamables y reduciendo el riesgo de propagación de incendios forestales. Mediante el análisis más específico de los perfiles de densidad y el cartografiado de métricas derivadas, esta línea de trabajo nos permitirá profundizar en la comprensión de la dinámica vertical del bosque mediterráneo, discernir de manera efectiva entre los estratos arbustivos y arbóreos, y cuantificar el cambio de la estructura, elementos clave en la gestión silvícola y en la prevención de los incendios forestales.

5. AGRADECIMIENTOS

La financiación ha sido aportada por el proyecto de I+D+i PID2020-117808RB-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Crespo-Peremarch, P., Tompalski, P., Coops, N.C., Ruiz, L.Á. (2018). Characterizing understory vegetation in Mediterranean forests using full-waveform airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 217, 400-413. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.033>
- Danson, F.M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., Allgower, B. (2007). Forest Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 157-160. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.887064>
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*, 52, 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2)
- Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Næsset, E., Ørka, H.O., Coops, N.C., Hilker, T. *et al.* (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>