

Caracterización de la madurez forestal utilizando LiDAR

Velasco, Ayanta ¹ Barquín, Jose ¹ Concostrina-Zubiri, Laura ¹

¹ Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España

ORCID: Velasco 0009-0007-0001-2270 Barquín 0000-0003-1897-2636 Concostrina-Zubiri 0000-0001-7781-6030

Correspondencia: ayanta.velasco@unican.es jose.barquin@unican.es laura.concostrina@unican.es

RESUMEN

Los bosques maduros tienen un papel crucial en la mitigación del cambio climático, el ciclo del agua, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto está relacionado con la mayor complejidad estructural y diversidad funcional asociada a la madurez del bosque. Por lo tanto, la madurez forestal debe considerarse una característica clave para desarrollar políticas de conservación y gestión forestal; sin embargo, su definición y cuantificación siguen siendo complejas. En este estudio proponemos la caracterización de la madurez del bosque usando métricas estructurales derivadas de LiDAR, algoritmos de clasificación no supervisada y segmentación por formaciones forestales. Para ello, se calcularon diversas métricas estructurales relacionadas con la estructura 3D del bosque. La clasificación se aplicó, por separado, a las formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de Cantabria: hayedos, robledales, melojares y encinares. El número de componentes principales necesarios para explicar el 80 % de la varianza y las métricas más relevantes en su diferenciación varió entre formaciones. No obstante, hubo un patrón consistente para todas ellas, donde el primer componente principal estuvo asociado a métricas relacionadas con mayores alturas de copa, mientras que el segundo componente se relacionaba más con la heterogeneidad y complejidad vertical. La interpretación de las clases de madurez obtenidas se llevó a cabo combinando la interpretación de las distribuciones de cada una de las métricas estructurales y fotointerpretación, encontrándose diferentes patrones entre formaciones. Los resultados muestran que la metodología propuesta es capaz de discriminar de forma robusta grupos de madurez forestal y presenta un elevado potencial para su aplicación en planificación y gestión forestal y territorial.


Palabras clave: *madurez forestal, airborne laser scanning, métricas estructurales, conservación forestal*


Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 9 febrero 2026


Caracterización de la madurez forestal utilizando LiDAR

Velasco, Ayanta ⁽¹⁾, Barquín, Jose ⁽¹⁾, Concostrina-Zubiri, Laura ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, España.

 0009-0007-0001-2270, ayanta.velasco@unican.es.

 0000-0003-1897-2636, jose.barquin@unican.es.

 0000-0001-7781-6030, laura.concostrina@unican.es.

Resumen: Los bosques maduros tienen un papel crucial en la mitigación del cambio climático, el ciclo del agua, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto está relacionado con la mayor complejidad estructural y diversidad funcional asociada a la madurez del bosque. Por lo tanto, la madurez forestal debe considerarse una característica clave para desarrollar políticas de conservación y gestión forestal; sin embargo, su definición y cuantificación siguen siendo complejas. En este estudio proponemos la caracterización de la madurez del bosque usando métricas estructurales derivadas de LiDAR, algoritmos de clasificación no supervisada y segmentación por formaciones forestales. Para ello, se calcularon diversas métricas estructurales relacionadas con la estructura 3D del bosque. La clasificación se aplicó, por separado, a las formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de Cantabria: hayedos, robledales, melojares y encinares. El número de componentes principales necesarios para explicar el 80 % de la varianza y las métricas más relevantes en su diferenciación varió entre formaciones. No obstante, hubo un patrón consistente para todas ellas, donde el primer componente principal estuvo asociado a métricas relacionadas con mayores alturas de copa, mientras que el segundo componente se relacionaba más con la heterogeneidad y complejidad vertical. La interpretación de las clases de madurez obtenidas se llevó a cabo combinando la interpretación de las distribuciones de cada una de las métricas estructurales y fointerpretación, encontrándose diferentes patrones entre formaciones. Los resultados muestran que la metodología propuesta es capaz de discriminar de forma robusta grupos de madurez forestal y presenta un elevado potencial para su aplicación en planificación y gestión forestal y territorial.

Palabras clave: madurez forestal, airborne laser scanning, métricas estructurales, conservación forestal

Characterisation of forest maturity using LiDAR

Abstract: *Mature forests play a crucial role in climate change mitigation, the water cycle, biodiversity conservation, and the provision of ecosystem services. This is related to the greater structural complexity and functional diversity associated with forest maturity. Therefore, forest maturity should be considered a key characteristic for developing forest conservation and management policies; however, its definition and quantification remain complex. In this study, we propose the characterisation of forest maturity using structural metrics derived from LiDAR, unsupervised classification algorithms, and segmentation by forest formations. To this end, various structural metrics related to the 3D structure of the forest were calculated. Classification was applied separately to the most extensive natural forest formations in the region of Cantabria: beech, oak, Pyrenean oak, and holm oak forests. The number of principal components needed to explain 80% of the variance and the most relevant metrics in their differentiation varied between formations. However, there was a consistent pattern for all of them, where the first principal component was associated with metrics related to greater canopy heights, while the second component was more related to vertical heterogeneity and complexity. The interpretation of the maturity classes obtained was carried out by combining the interpretation of the distributions of each of the structural metrics and photo interpretation, finding different patterns between formations. The results show that the proposed methodology is able to robustly discriminate between forest maturity groups and has high potential for application in forest and land-use planning and management.*

Keywords: *forest maturity, airborne laser scanning, structural metrics, forest conservation*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques maduros desempeñan un papel crucial en la regulación de los flujos de agua y energía entre la atmósfera y el suelo (Belmar *et al.*, 2018; Frey *et al.*, 2016). Su complejidad estructural y diversidad funcional, que generalmente aumentan con la sucesión ecológica (Chazdon *et al.*, 2016), modulan estos intercambios e influyen en múltiples procesos hidrológicos. La conservación de estos bosques resulta especialmente interesante, pues contribuyen a la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos (Watson *et al.*, 2018), incluyendo aquellos relacionados con la regulación hidrológica. Sin embargo, la falta de consenso en una definición concreta y común de madurez forestal, generada principalmente por la cantidad de métodos disponibles para estimarla, hace que su aplicación a grandes escalas espaciales sea todavía compleja. Además, las limitaciones asociadas a estas metodologías (e.g., campañas de campo intensivas o disponibilidad de datos precisos de la edad o la historia de la masa) dificultan todavía más la caracterización de la madurez forestal y, por tanto, la diferenciación de los bosques maduros. En este contexto, la estructura de los bosques constituye un conjunto de rasgos que evolucionan gradualmente a lo largo del desarrollo del ecosistema, reflejando sus dinámicas naturales. La teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para la caracterización estructural del bosque, al permitir su estimación de manera relativamente sencilla, replicable y escalable. No obstante, la mayoría de los estudios existentes combinan datos LiDAR con información procedente de sensores ópticos, inventarios forestales o muestreos de campo, no suelen discriminar en función de la composición específica de las masas forestales o se apoyan mayoritariamente en algoritmos de clasificación supervisada, lo que exige la disponibilidad de conjuntos de datos para la generación de grupos de entrenamiento y validación (de Assis Barros & Elkin, 2021; Martin *et al.*, 2021, entre otros).

En este estudio proponemos una metodología basada exclusivamente en datos LiDAR aerotransportados y clasificación no supervisada, con segmentación por formaciones forestales. Este enfoque permite que las categorías y patrones de madurez emerjan de la propia estructura del bosque y de forma específica para cada formación, evitando un sesgo inicial dado por etiquetas o umbrales establecidos *a priori*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se ha llevado a cabo en la región de Cantabria, situada en el norte de la Península Ibérica y que cuenta con una superficie forestal total de ca. 69%, según el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4). La cartografía de madurez se ha realizado para las cuatro formaciones forestales naturales con mayor extensión en la región de estudio (Fig. 1): hayedos (*Fagus sylvatica*, 15%), robledales (*Quercus robur* y *Quercus petraea*, 13%), melojares (*Quercus pyrenaica*, 13%) y encinares (*Quercus ilex*, 7%).

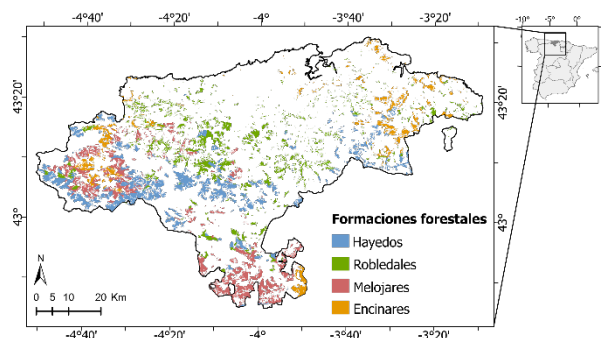


Figura 1. Área de estudio y distribución de las formaciones forestales de interés según el IFN4.

2.2. Datos LiDAR

Los datos LiDAR utilizados corresponden a las nubes de puntos generadas en los vuelos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA-LiDAR) de primera, segunda y tercera cobertura (Tabla 1). Todo el procesamiento y cálculo de las métricas estructurales se ha llevado a cabo a través del paquete lidR (Rousset *et al.*, 2020) en el programa Rstudio (versión R 4.5.1).

Tabla 1. Especificaciones de los vuelos LiDAR

Vuelo	Año adquisición	Densidad puntos
1º cobertura	2012	0.5 puntos/m ²
2º cobertura	2018	0.5 -2 puntos/m ²
3º cobertura	2023	5 puntos/m ²

2.2.1. Cálculo de métricas estructurales

La caracterización estructural de los bosques se basó en un conjunto de métricas estructurales descritas en la literatura, representativas tanto de la estructura vertical como horizontal del dosel forestal (Tabla 2), junto con otras asociadas a la distribución de alturas. Estas métricas se calcularon a partir de los datos LiDAR de 2023 normalizados, en formato ráster y con una resolución espacial de 10x10 m. Se calcularon también la media, máxima y moda de las alturas para las nubes de puntos LiDAR de 2012 y 2018, así como el cambio en la altura de la vegetación arbórea entre los distintos años de adquisición del LiDAR. Finalmente, se aplicó una máscara que delimita la extensión de cada formación forestal en el área de estudio, para segmentar el análisis por tipo de formación.

2.3. Análisis estadístico

Todas las métricas estructurales se apilaron en un stack multivariante. Se espera una alta correlación entre todas las variables estructurales, por ello, se aplicó un análisis de reducción de dimensionalidad (análisis de componentes principales, PCA, por sus siglas en inglés) sobre las variables previamente centradas y escaladas. Previamente, se calculó la correlación de Spearman entre las métricas y se eliminaron aquellas con $\rho > \pm 0,95$ con el objetivo de reducir la redundancia. A continuación, se llevó a cabo un análisis de clasificación no supervisada mediante el algoritmo K-means, empleando los componentes principales que explicaban más del 80 % de la varianza total. La determinación del

número óptimo de clústeres o grupos para cada formación se realizó mediante el método del codo. La diferenciación estructural entre los grupos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la inspección visual de las métricas más relevantes. La asignación final de las categorías de madurez se apoyó en los resultados estadísticos y en la fotointerpretación. El PCA y el análisis de agrupación se llevaron a cabo utilizando la librería Sklearn en Python (versión 3.13.5).

Tabla 2. Métricas estructurales LiDAR basadas en la literatura.

Métrica	Referencia
CC (canopy cover); CRR (canopy relief ratio); MOCH (mean outer canopy height); FHD (foliar height diversity); Rugosity; LAI (leaf area index)	Atkins <i>et al.</i> , 2023
DA (canopy density index A); DB (canopy density index B); VDR (vertical distribution ratio); VCI (vertical complexity index); sdHeight; cvHeight	Van Ewijk <i>et al.</i> , 2011
Gap fraction; sdCC	Martin <i>et al.</i> , 2021
Intensity mean; sdIntensity	Fuhr <i>et al.</i> , 2022

3. RESULTADOS

3.1. Características distintivas de las clases de madurez forestal

Por limitación de espacio, se muestran únicamente los resultados para los hayedos, que representan la formación forestal natural de mayor extensión en la región de estudio.

Se seleccionaron cinco componentes principales para la agrupación, explicando las dos primeras el 58% de la varianza total. El PC1 estuvo principalmente asociado a métricas relacionadas con la altura (e.g., alturas máximas y medias) y la cobertura del dosel, mientras que el PC2 estuvo dominado por métricas relacionadas con la heterogeneidad vertical del dosel (e.g., desviación estándar de los primeros retornos, rango intercuartílico), y por las distribuciones más bajas de las alturas (p5; Fig. 2).

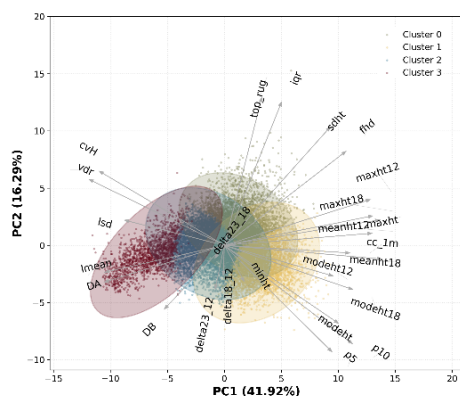


Figura 2. PCA y agrupación (n= 4) para hayedos.

El ANOVA reveló que todas las métricas estructurales discriminan de manera significativa los grupos de madurez (p-valor < 0.05). A partir de los valores y distribuciones de las métricas con mayor carga en la agrupación de madurez y de fotointerpretación, se asoció cada uno de ellos con diferentes estados de madurez forestal (Fig. 3).



Figura 3. Asignación de categoría de madurez a cada grupo.

Las métricas incluidas para la discriminación de grupos de madurez tras el análisis de correlación variaron según la formación, capturando características estructurales específicas. En la Tabla 3 se resumen algunos resultados relevantes del análisis estructural para todas las formaciones consideradas. Los grupos de métricas relacionadas con la PC1 (métricas relacionadas con alturas más altas) y PC2 (métricas de complejidad vertical) se mantuvieron constantes para todas las formaciones.

Tabla 3. Resultados del análisis estructural de madurez forestal para otras formaciones forestales.

	Robledales	Melojares	Encinares
PCA 80%	5	6	6
Clústeres	4	4	4
	Hmediana	%huecos >10m	%huecos >10m
Métricas	p25	Hmedia - 2018	Hmediana
	Hmedia - 2018	Hmáxima	Percentil25

3.2. Cartografía de madurez forestal

La cartografía de madurez forestal para la región de Cantabria muestra que en los hayedos y los robledales predominan los estados intermedios y maduros, mientras que en los melojares lo hacen los estados más avanzados de madurez (maduro y viejo). Por otro lado, los encinares están dominados por estados intermedios, con poca representación de masas maduras (Fig. 4).

4. DISCUSIÓN

Las diferencias significativas entre los grupos de madurez para todas las métricas estructurales evidencian que estos representan estados estructurales diferenciados. Las métricas estructurales que definen cada uno de los componentes principales, así como los grupos de madurez, representan gradientes de desarrollo estructural relacionados principalmente con mayores alturas y con la complejidad vertical del dosel. Estos resultados son coherentes con lo observado en estudios previos donde la altura máxima y la desviación estándar de la altura eran dos de los predictores más importantes para la madurez del bosque (Fuhr *et al.*,

2022). De hecho, las métricas relacionadas con la complejidad vertical contribuyen a mejorar la diferenciación entre los estados medios y tardíos de la madurez forestal (van Ewijk *et al.*, 2011). Los hayedos y los robledales, que son las formaciones naturales con mayor superficie en Cantabria, presentan la distribución más equilibrada entre estados maduros (maduros y viejos) e intermedios, lo que podría sugerir una menor intensidad de gestión o perturbaciones antrópicas pasadas.

Los resultados sugieren que el uso de métricas estructurales derivadas de LiDAR podría contribuir a caracterizar la madurez forestal y diferenciar patrones relevantes entre formaciones, destacando su potencial aplicación en la planificación forestal y territorial. Entre los próximos pasos de este trabajo se incluye la validación de los grupos de madurez obtenidos y de las métricas estructurales, a partir de datos recogidos en campañas de campo y del IFN, con el fin de reforzar la validez de los resultados y la interpretación de la cartografía.

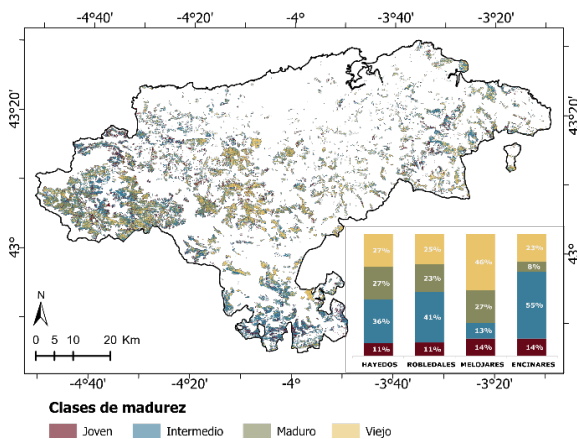


Figura 4. Cartografía de madurez forestal.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del proyecto europeo NBRACER (Programa Horizonte Europa, en virtud del acuerdo de subvención 101112836). LCZ recibió el apoyo del contrato Ramón y Cajal RYC2023-042640-I, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+.

6. REFERENCIAS

Atkins, J. W., Costanza, J., Dahlin, K. M., Dannenberg, M. P., Elmore, A. J., Fitzpatrick, M. C., Hakkenberg, C. R., Hardiman, B. S., Kamoske, A., LaRue, E. A., Silva, C. A., Stovall, A. E. L., & Tielens, E. K. (2023). Scale dependency of lidar-derived forest structural diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, *14*(2), 708–723. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14040>

Belmar, O., Barquín, J., Álvarez-Martínez, J. M., Peñas, F. J., & Del Jesus, M. (2018). The role of forest maturity in extreme hydrological events. *Ecohydrology*, *11*(4), 1–12. <https://doi.org/10.1002/eco.1947>

Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-

Rocek, J., Vieira, I. C. G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, *45*(5), 538–550. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>

de Assis Barros, L., & Elkin, C. (2021). An index for tracking old-growth value in disturbance-prone forest landscapes. *Ecological Indicators*, *121*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107175>

Frey, S. J. K., Hadley, A. S., Johnson, S. L., Schulze, M., Jones, J. A., & Betts, M. G. (2016). Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances*, *2*(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501392>

Fuhr, M., Lalechère, E., Monnet, J. M., & Bergès, L. (2022). Detecting overmature forests with airborne laser scanning (ALS). *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, *8*(5), 731–743. <https://doi.org/10.1002/rse2.274>

Martin, M., Cerrejón, C., & Valeria, O. (2021). Complementary airborne LiDAR and satellite indices are reliable predictors of disturbance-induced structural diversity in mixed old-growth forest landscapes. *Remote Sensing of Environment*, *267*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112746>

Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Meador, A. S., Bourdon, J. F., de Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *In Remote Sensing of Environment (Vol. 251)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>

van Ewijk, K. Y., Treitz, P. M., & Scott, N. A. (2011). Characterizing Forest Succession using LiDAR derived metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *77*(3), 261–269.

Watson, J. E. M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I., Ray, J. C., Murray, K., Salazar, A., McAlpine, C., Potapov, P., Walston, J., Robinson, J. G., Painter, M., Wilkie, D., Filardi, C., Laurance, W. F., Houghton, R. A., ... Lindenmayer, D. (2018). The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology and Evolution*, *2*(4), 599–610. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>