CONAMA 2026

Caracterización tridimensional de fustes de Pinus pinaster mediante LiDAR para explorar su potencial en la evaluación de la calidad de la madera

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Víctor Méndez Vales. Investigador. Universidad de Vigo.

Otros Autores: Gabriel Eduardo Suárez Fernández. Investigador. Universidad de Vigo.

Henrique Lorenzo Cimadevila. Profesor. Universidad de Vigo.

Joaquín Martínez Sánchez. Profesor. Universidad de Vigo.

Índice

Resumen **1**

1. Introducción **2**

2. Metodología **3**

2.1. Datos y selección de árboles 3

2.2. Proporción de puntos de copa respecto a los del tronco y altura del primer punto de copa 4

2.3. Inclinación del fuste 5

2.4. Caracterización de la variación radial 6

3. Resultados y discusión **7**

3.1. Caracterización geométrica de los fustes 7

3.2. Distribución de puntos 9

4. Conclusiones **10**

5. Bibliografía **11**

6. Agradecimientos **12**

Resumen

Las tecnologías LiDAR se emplean ampliamente en el inventario forestal para estimar variables como la altura, el diámetro y el volumen de los árboles. Sin embargo, la cuantificación de las existencias no describe por completo la geometría de los fustes, cuyas características pueden condicionar el destino de aprovechamiento de la madera. La rectitud, la inclinación y la variación del grosor a lo largo del tronco son atributos potencialmente relevantes que podrían complementar las variables convencionales de inventario y contribuir a una caracterización forestal más orientada a las características del recurso maderero.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es explorar el potencial de las nubes de puntos tridimensionales para caracterizar la geometría de fustes de *Pinus pinaster*. Para ello, se aplica un procedimiento que combina la selección de puntos del tronco, el análisis de componentes principales para estimar su orientación y la reconstrucción de una trayectoria curva. Esta se divide en secciones longitudinales de medio metro, sobre las que se calculan estadísticos de las distancias de los puntos respecto al eje, incluidos la mediana, la media y distintos percentiles. A partir de estas métricas se obtienen indicadores de inclinación, longitud de la trayectoria reconstruida, variación longitudinal del perfil radial estimado y pendiente de dicho perfil, así como información sobre la distribución de puntos por sección.

Este procedimiento ha permitido obtener perfiles e indicadores geométricos coherentes a nivel biológico aún con las diferencias que presentan distintos árboles en la naturaleza. Estos resultados preliminares respaldan la viabilidad de utilizar nubes de puntos para describir cuantitativamente distintos aspectos de la geometría de los fustes, más allá de las variables globales habituales del inventario forestal. No obstante, los indicadores radiales derivados de la trayectoria reconstruida requieren validación frente a mediciones de referencia y no constituyen, por sí solos, medidas directas de la calidad comercial de la madera. Como siguiente paso, se plantea evaluar la consistencia de los indicadores y estudiar su relación con atributos relevantes para el aprovechamiento maderero. Esta aproximación busca contribuir al desarrollo de métodos de caracterización forestal que consideren no solo la cantidad de madera disponible, sino también en la calidad que presenta esa madera, lo cual condiciona el aprovechamiento a un nivel similar al del volumen de madera presente.

Palabras clave: LiDAR; *Pinus pinaster*; fustes; geometría tridimensional; calidad potencial de la madera; inventario forestal.

1. Introducción

La caracterización de los recursos forestales constituye una herramienta fundamental para la planificación y la gestión sostenible de los montes (Boukhris et al., 2024). El conocimiento de variables de inventario como diámetros, alturas y densidad de las masas permite estimar existencias, analizar su evolución y proporcionar información para la toma de decisiones selvícolas y de aprovechamiento. En este ámbito, las tecnologías de teledetección tridimensional, y particularmente LiDAR, han ampliado las posibilidades de obtener información detallada sobre la estructura forestal (Windrim & Bryson, 2020).

Las nubes de puntos LiDAR representan la superficie de los elementos interceptados por los pulsos láser mediante conjuntos de coordenadas tridimensionales. Su uso en el ámbito forestal ha permitido desarrollar procedimientos para estimar variables dasométricas, describir la estructura vertical de la vegetación y caracterizar árboles individuales (Prendes et al., 2022). La disponibilidad de información espacial detallada ofrece, además, la posibilidad de estudiar aspectos de la forma de los árboles que no quedan completamente representados mediante variables globales como la altura o el diámetro (Bienert et al., 2021).

La geometría del fuste es especialmente relevante cuando se pretende avanzar desde la cuantificación de las existencias hacia una caracterización más detallada del recurso maderero (Cattaneo et al., 2024) . Dos árboles con dimensiones generales similares pueden presentar diferencias en la inclinación, la curvatura o la variación del grosor a lo largo del tronco. Estas características podrían condicionar las posibilidades de aprovechamiento y transformación de la madera.

La evaluación de la forma de los fustes mediante escáner láser terrestre ya ha sido abordada en trabajos específicos sobre parámetros geométricos de árboles individuales, incluido *Pinus pinaster* (Prendes et al., 2021), pero se queda únicamente en el estudio de la curvatura. Asimismo, el escaneo láser terrestre y aerotransportado ha demostrado su potencial para obtener información tridimensional de los árboles y estimar características relacionadas con la madera en pie, aunque la calidad de estas estimaciones puede verse condicionada por factores como la oclusión de los fustes, la distribución y densidad de los puntos o la cobertura incompleta de determinadas partes del árbol (Van Leeuwen et al., 2011).

En este contexto, el presente trabajo plantea una aproximación exploratoria de la reconstrucción del fuste de árboles en base a nubes de puntos de alta densidad obtenidas con LiDAR, para tratar calcular indicadores geométricos orientados a construir indicadores de la calidad de la madera en pie. Como caso de estudio se usaron nubes de puntos procedentes de plantaciones de *Pinus pinaster* que se procesaron para separar individualmente los árboles, y dividir éstos en tronco, copa y ramas para así poder obtener los distintos indicadores a evaluar.

El objetivo de este trabajo es explorar la obtención de indicadores geométricos a partir de nubes de puntos LiDAR de árboles individuales, ampliando la caracterización de los fustes más allá de los

parámetros convencionales de curvatura e inclinación, mediante el análisis de su forma, su variación longitudinal y su relación con la estructura de la copa

2. Metodología

2.1. Datos iniciales y procesamiento

Los datos de partida son nubes de puntos correspondientes a una plantación de *Pinus pinaster* que fue escaneada con el sensor DJI Zenmuse L1 acoplado al dron DJI Matrice 300 RTK, que cuenta con una capacidad de captura de 240000 puntos por segundo con un rango máximo de unos 190 m, lo cual permite obtener densidades de puntos muy elevadas. Para facilitar el análisis a escala individual, se realizó un procesamiento previo sobre las nubes de puntos basado en la segmentación semántica y de instancias de la nube. La primera permitió asignar a los puntos una categoría estructural (tronco, ramas o copa), mientras que la segunda permitió identificar y separar los distintos árboles presentes en la escena. La combinación de ambas segmentaciones posibilitó obtener nubes de puntos individualizadas, en las que cada punto disponía tanto de una identificación de árbol como de una etiqueta correspondiente a su componente estructural (Figura 1).

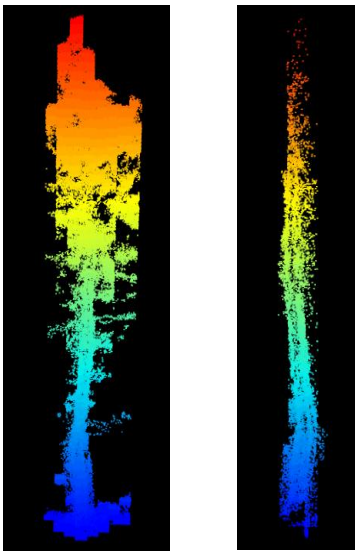


Figura 1: Árbol 1 completo aislado (izquierda) y tronco del árbol 1 (derecha)

Para analizar la metodología propuesta, se seleccionaron aleatoriamente quince árboles entre los individuos identificados en la nube de puntos (Cuadro 1). Para cada árbol se obtuvieron distintos indicadores geométricos potencialmente relacionados con la calidad y el aprovechamiento de la madera: altura del primer punto de copa, proporción entre el número de puntos de copa y de tronco, inclinación del fuste y variación longitudinal de sus dimensiones (conicidad). Estos indicadores, considerados en conjunto con el volumen del árbol, pueden aportar información sobre sus características estructurales y contribuir a una valoración preliminar de su posible destino industrial y valor comercial.

Cuadro 1: Características de los árboles seleccionados

ID	Altura (m)	Número puntos fuste
1	21.25	12460
2	24.09	9305
3	18.53	7187
4	28.42	13822
5	28.13	7191
6	26.13	8040
7	27.8	8555
8	18.05	7401
9	27.65	10353
10	27.69	9626
11	27.24	6925
12	27.14	7767
13	24.98	8369
14	23.27	9938
15	26.88	13199

2.2. Proporción de puntos de copa respecto a los del tronco y altura del primer punto de copa

Uno de los parámetros más importantes a la hora de decidir el destino de la madera es la cantidad de nudos que presente. Los nudos son puntos frágiles en la madera, al modificar la orientación de las fibras se pude reducir la resistencia de la madera a esfuerzos, por lo que hay que sanear la madera de nudos antes de usarla. Para tratar de evaluar este parámetro se proponen dos indicadores, por un lado la proporción entre puntos de copa y puntos de tronco, con este se pretende obtener una aproximación a la distribución relativa del árbol, una copa más desarrollada puede estar relacionada con una mayor presencia de ramas y, por ende de nudos; y por otro la altura de la primera rama, calculada como el punto etiquetado como rama con una menor altura, cuanto más baja esté la primera rama, indica que la ramificación comienza antes, por lo que el número de nudos puede ser mayor.

Para caracterizar la distribución de los puntos entre la copa y el tronco, se calculó la razón entre el número de puntos pertenecientes a la copa y el número total de puntos correspondientes al tronco. Como puntos de copa se seleccionó un umbral mínimo de altura a la segmentación semántica realizada sobre las nubes basada en la edad y altura promedio de los árboles de la finca analizada.

La proporción se calculó mediante la expresión:

$$R_{ID} = \frac{Nº\ puntos\ copa}{Nº\ puntos\ tronco}$$

Donde *Nº puntos de copa* representa el número de puntos clasificados como copa y *Nº puntos tronco* el número total de puntos clasificados como tronco. Para expresar el resultado en porcentaje, la razón se multiplicó por 100.

La altura de la primera rama se calculó como la altura (coordenada Z) más baja entre los puntos etiquetados como rama.

2.3. Inclinación del fuste

La inclinación del fuste se estimó a partir de la distribución tridimensional de los puntos correspondientes al tronco. En primer lugar, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para determinar la dirección dominante de su estructura longitudinal.

A partir del eje inicial, se calcularon las distancias de los puntos a dicha dirección y se obtuvo la distancia mediana. Debido a que las segmentaciones realizadas por el modelo pueden no ser perfectas y asignar a instancias puntos de árboles alejados que pueden influir en los cálculos de los distintos indicadores, se llevó a cabo un filtrado en función de la distancia mediana de los puntos al eje calculado con el PCA:

$$d_f = 3.5\ x\ d_{med}$$

Donde d_f es la distancia de filtrado alrededor del eje calculado con el PCA, y d_{med} es la mediana de las distancias de cada punto al eje.

A continuación, se repitió el análisis de componentes principales con los puntos filtrados, obteniendo un vector unitario que representa la dirección dominante del fuste. El ángulo de inclinación respecto a la vertical se calculó mediante:

$$\theta = \arccos(|v_z|)\ x\ \frac{180}{\pi}$$

Donde v_z es la componente vertical del vector director obtenido mediante el análisis de componentes principales. El valor absoluto permite expresar la inclinación independientemente del sentido del vector. El resultado se expresa en grados, valores próximos a 0° indican una orientación cercana a la vertical, mientras que valores mayores representan una inclinación más pronunciada.

La inclinación del fuste es un indicador que puede aportar mucha información sobre la posible calidad de la madera. Por el método de cálculo utilizado, una inclinación marcada del fuste puede deberse a un fuste recto pero que esté inclinado con respecto al suelo, o a un fuste curvo, de forma que el ápice no esté alineado con la base del tronco, por lo que el vector sale con cierta inclinación. Ambas son situaciones no deseables desde el punto de vista de la calidad de la madera, un fuste recto pero inclinado puede producir madera de reacción, de propiedades distintas al resto, y que puede condicionar su aprovechamiento, además, normalmente la madera del lado inclinado está acostumbrada a trabajar a contracción, y la del otro lado a tracción, por lo que pueden presentar una resistencia menor a la habitual si se someten a otros esfuerzos; por su parte, un fuste curvo, además de presentar condicionantes de tipo de madera y esfuerzos como los anteriormente mencionados, es problemático para su aprovechamiento a nivel físico tanto en campo como en aserradero, por lo que lo habitual es que se destinen a trituración, un destino menos rentable económicamente que el de aserrado por ejemplo.

2.4. Caracterización de la variación radial

Para describir la variación geométrica del fuste a lo largo de su longitud, se ajustó una curva principal a la distribución tridimensional de sus puntos (Figura 2). Esta curva representa la trayectoria longitudinal dominante del tronco y permite establecer una referencia común para caracterizar su perfil. A diferencia del PCA previamente calculado, la curva principal describe las variaciones de curvatura a lo largo del fuste.

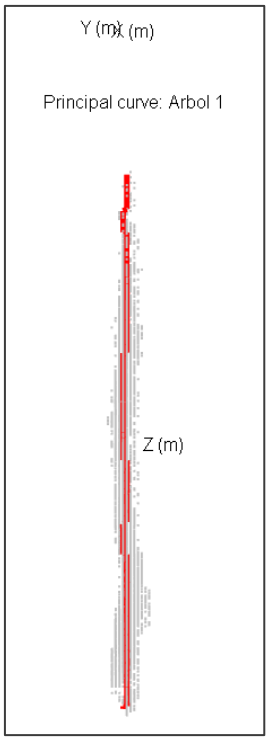


Figura 2: Ajuste de la curva principal al fuste del árbol 1

Una vez obtenida la curva, se calculó para cada punto su distancia a la trayectoria. Posteriormente, el fuste se dividió en segmentos longitudinales de 0.5 m. En cada segmento se calcularon la media, la mediana y los percentiles 5, 90 y 95 de las distancias a la curva. También se registró el número

de puntos disponibles, estableciendo un mínimo de 50 puntos por segmento para considerar válidos sus resultados.

La mediana de las distancias se utilizó como indicador representativo del perfil de cada segmento, reduciendo la influencia de valores extremos. Para estudiar su evolución longitudinal, se ajustó un modelo lineal ponderado:

$$r_i = \beta_0 + \beta_1 \, x \, s_i + \varepsilon_i$$

Donde r_i representa la mediana de las distancias en el segmento i, s_i su posición longitudinal, β_0 la ordenada en el origen, β_1 la pendiente del modelo y ε_i el término de error. El ajuste se ponderó por el número de puntos de cada segmento, de modo que los segmentos con mayor representación tuvieran una influencia proporcionalmente mayor.

A partir de la pendiente estimada, se definió un índice de variación longitudinal del perfil:

$$I = 100 \, x \, \beta_1$$

El factor 100 permite expresar la pendiente en centímetros por metro cuando las distancias y la posición longitudinal se introducen en metros. Un valor negativo indica una disminución de las distancias representativas a lo largo de la trayectoria, mientras que un valor positivo indica un aumento.

Este índice constituye una aproximación de la evolución de la forma del perfil del fuste. Este resultado es también de suma relevancia, ya que proporciona información sobre el rendimiento obtenido por fuste. Una troza con un perfil muy cónico limita el número de piezas que pueden extraerse de ella, además, también condiciona las dimensiones de las susodichas piezas. Todo esto conlleva que, para obtener piezas rectangulares por aserrado hay que descartar más material que en otra troza que no sea tan cónica, con lo que el rendimiento económico es menor. A todo esto, hay que sumar que los destinos más deseables a nivel económico como el de aserrado, necesitan un diámetro mínimo de 7.5 m para trabajar, con lo que, cuanto menos cónica sea una pieza, más se podrá trabajar en estos destinos.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización geométrica de los fustes

La metodología se aplicó a quince árboles de Pinus pinaster seleccionados para evaluar su capacidad de caracterización geométrica a partir de nubes de puntos tridimensionales. Los indicadores obtenidos muestran diferencias apreciables entre individuos tanto en la geometría general de los fustes como en la distribución de los radios a lo largo de su eje longitudinal (Cuadro 2).

La longitud estimada del eje curvo osciló entre 18,20 m en el árbol 3 y 28,80 m en el árbol 9. Se observa que varios individuos presentan longitudes próximas a los 28 m, mientras que los árboles 3 y 8 muestran los valores más reducidos, con 18,20 y 18,31 m, respectivamente. Estas diferencias reflejan la variabilidad en la extensión geométrica de los fustes analizados.

La inclinación estimada respecto a la vertical presentó un intervalo comprendido entre 0,70° en el árbol 15 y 9,22° en el árbol 7. Este último registró la mayor inclinación, seguido de los árboles 11 y 9, con valores de 7,91° y 7,00°, respectivamente. En el extremo opuesto, los árboles 14 y 15 mostraron inclinaciones inferiores a 1°. Estos resultados ponen de manifiesto diferencias entre individuos en la orientación de su eje dominante, estimado mediante el análisis de componentes principales (PCA).

En cuanto a la altura de la primera rama, estimada a partir del primer punto clasificado como copa, se obtuvieron valores comprendidos entre 4,92 m en el árbol 13 y 15,23 m en el árbol 7. También destacan los árboles 15 y 12, con alturas de 14,56 y 13,62 m, respectivamente. Por el contrario, los árboles 1, 2, 11, 13 y 14 presentan valores inferiores a 7,1 m. Esta variable permite describir diferencias en la distribución vertical de los puntos clasificados como copa, aunque debe interpretarse como una estimación derivada de la clasificación de la nube de puntos y no como una medición directa de la altura de inserción de la primera rama.

El ratio copa/tronco, calculado a partir del número de puntos clasificados como copa y tronco, mostró una variabilidad considerable, con valores entre 5,87 en el árbol 1 y 27,70 en el árbol 11. Los árboles 9 y 7 también presentaron valores elevados, de 21,11 y 19,79, respectivamente. Por el contrario, los árboles 1, 8, 13 y 15 registraron ratios inferiores a 10. Esta variabilidad refleja diferencias en la representación relativa de ambas estructuras dentro de las nubes de puntos. No obstante, al tratarse de una relación basada en el número de retornos clasificados, está condicionada por la densidad de puntos, la oclusión y la calidad de la clasificación semántica, por lo que no debe interpretarse directamente como una proporción volumétrica o dimensional entre copa y tronco. La mediana global de los radios estimados osciló entre 19,61 cm en el árbol 7 y 30,02 cm en el árbol 9. Los árboles 2 y 12 también presentaron valores relativamente elevados, de 28,48 y 26,78 cm, mientras que los árboles 5, 6, 7 y 11 mostraron medianas inferiores a 22 cm. Estos resultados evidencian diferencias en las dimensiones radiales estimadas entre los individuos. Sin embargo, la mediana global constituye un indicador sintético que no permite describir por sí solo las variaciones locales del perfil del fuste.

Cuadro 2: Indicadores geométricos obtenidos para los quince árboles analizados

Árbol	Longitud del eje (m)	Ratio copa/fuste	Altura primera rama	Inclinación (º)	Radio mediano global (cm)	Pendiente radial (cm/m)
1	21.32	5.87	7.02	3.74	24.99	-1.190
2	23.95	16.76	5.20	1.51	28.48	-0.292
3	18.20	15.00	6.34	4.50	24.45	-0.251
4	28.56	14.62	8.05	5.08	23.56	-0.643

5	27.11	18.47	12.87	7.21	21.43	-0.584
6	26.76	9.59	9.49	3.19	21.84	-0.67
7	28.48	19.79	15.23	9.22	19.61	-0.34
8	18.31	9.13	10.66	4.31	23.88	-1.64
9	28.80	21.11	7.23	7.00	30.02	-1.30
10	28.44	14.70	6.32	1.83	26.05	-0.61
11	28.39	27.70	5.41	7.91	21.20	-0.40
12	27.57	11.07	13.62	4.77	26.78	-0.28
13	25.32	9.56	4.92	4.80	22.48	-1.51
14	23.89	10.80	5.11	0.86	23.50	-0.17
15	27.31	9.65	14.56	0.70	26.72	-0.39

La comparación de la pendiente radial aporta información complementaria sobre la evolución del radio a lo largo del eje curvo. El árbol 8 presentó la pendiente negativa de mayor magnitud, con −1,64 cm/m, seguido de los árboles 13 y 9, con −1,51 y −1,30 cm/m, respectivamente. Por el contrario, los árboles 14, 3 y 2 mostraron las pendientes más próximas a cero, con −0,17, −0,251 y −0,292 cm/m. Estos resultados indican que existen diferencias importantes en la variación longitudinal del radio entre los individuos. Así, árboles con valores relativamente próximos de radio mediano global pueden presentar patrones de conicidad distintos. Por ejemplo, los árboles 1 y 8 presentan radios medianos de 24,99 y 23,88 cm, respectivamente, pero sus pendientes radiales son de −1,19 y −1,64 cm/m.

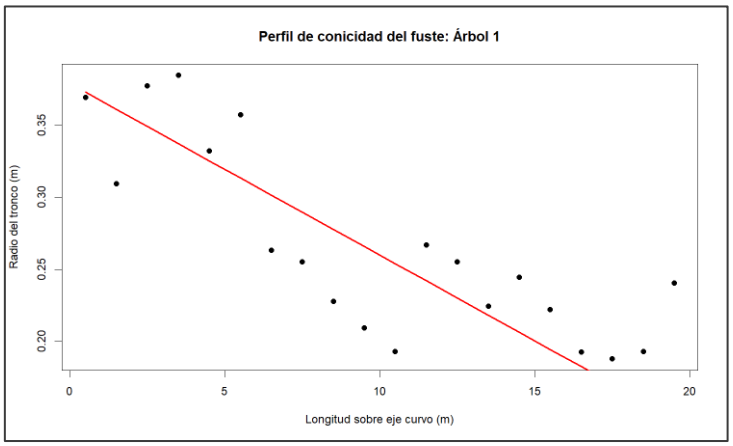


Figura 3: Perfil de conicidad del árbol 1

3.2. Distribución de puntos

El número total de puntos empleados en el análisis constituye un factor relevante para interpretar los perfiles radiales y la geometría reconstruida de los fustes. La disponibilidad de puntos condiciona

la representación de las secciones transversales y, por tanto, la estabilidad de los ajustes geométricos realizados en cada rodaja.

La distribución de puntos por rodaja permite identificar diferencias en la disponibilidad de información a lo largo del eje curvo. En particular, las zonas con menor número de retornos pueden ofrecer una representación menos completa de la sección transversal, mientras que las concentraciones de puntos en determinados tramos pueden estar relacionadas con la distribución de la vegetación, la geometría de adquisición o posibles problemas de segmentación.

Esta cuestión resulta especialmente relevante en la interpretación de los perfiles radiales. Las variaciones del radio estimado no tienen por qué responder exclusivamente a cambios reales en la geometría del fuste, ya que también pueden estar condicionadas por la disponibilidad y distribución de los puntos utilizados para ajustar las secciones. Por ello, la interpretación conjunta del perfil radial y del número de puntos por rodaja permite identificar tramos que requieren una revisión más detallada.

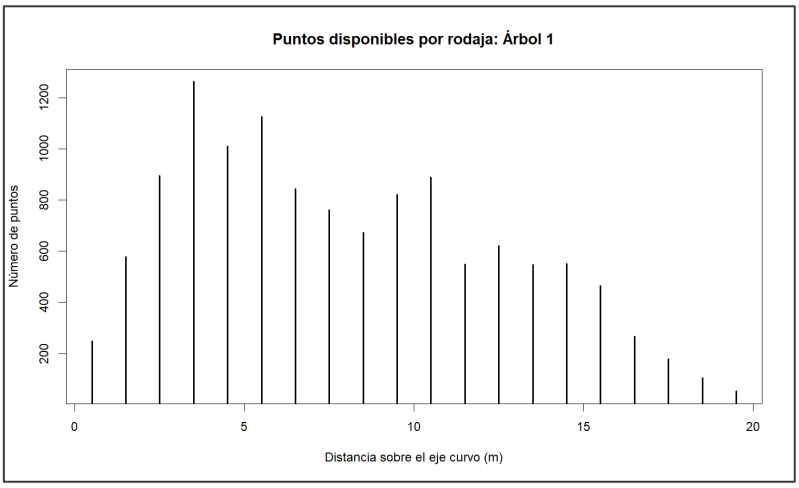


Figura 4: Número de puntos por rodaja del tronco del árbol 1

Por tanto, la densidad de puntos por rodaja debe considerarse un indicador de apoyo para interpretar los perfiles. Las rodajas con pocos puntos pueden ofrecer estimaciones menos representativas, mientras que una concentración anómala de puntos en un tramo podría reflejar problemas de segmentación o de correspondencia entre los puntos y el eje curvo. La evaluación de estas situaciones permitiría distinguir mejor entre variaciones geométricas plausibles y posibles artefactos del procesamiento.

4. Conclusiones

El presente trabajo ha explorado la viabilidad de utilizar nubes de puntos LiDAR obtenidas mediante UAV para caracterizar la geometría tridimensional de fustes individuales de *Pinus pinaster*. La metodología aplicada permitió reconstruir la trayectoria longitudinal de los fustes y obtener indicadores relacionados con su inclinación y con la variación de las distancias de los puntos respecto al eje curvo.

Los resultados obtenidos en los quince árboles analizados muestran diferencias en la longitud de los ejes reconstruidos, la inclinación estimada y la evolución longitudinal del perfil radial. En particular, la comparación de las pendientes permitió identificar tendencias generales de variación diferentes entre individuos, mientras que los perfiles por segmentos ofrecieron información más detallada sobre los cambios locales. Esto pone de manifiesto la utilidad de combinar indicadores sintéticos con representaciones longitudinales para describir la geometría de los fustes.

La incorporación de indicadores relacionados con la copa amplió la descripción geométrica de los individuos. Estos indicadores permiten complementar la caracterización del fuste con información sobre la distribución vertical y la representación relativa de las estructuras arbóreas en la nube de puntos. No obstante, su interpretación está condicionada por la calidad de la clasificación semántica, la densidad de puntos y los posibles efectos de oclusión.

La distribución del número de puntos entre segmentos también evidenció la importancia de considerar la representatividad de los datos al interpretar los perfiles. Las variaciones en la disponibilidad de puntos pueden influir en las estimaciones obtenidas, por lo que resulta necesario revisar los tramos con distribuciones irregulares y evaluar la sensibilidad de los indicadores a la segmentación y al ajuste de la curva principal.

Como líneas futuras de investigación, se plantea evaluar la estabilidad de los indicadores ante cambios en los parámetros de procesamiento, analizar métodos alternativos para caracterizar las variaciones locales del fuste y contrastar las estimaciones con mediciones de referencia. Estos avances permitirían determinar el potencial de la metodología para complementar los inventarios forestales convencionales y explorar su aplicación futura en la caracterización del recurso maderero.

5. Bibliografía

[1] Bienert, A., Georgi, L., Kunz, M., Von Oheimb, G., & Maas, H. G. (2021). Automatic extraction and measurement of individual trees from mobile laser scanning point clouds of forests. *Annals of Botany*, *128*(6), 787–804. https://doi.org/10.1093/aob/mcab087

[2] Boukhris, I., Puletti, N., Vonderach, C., Guasti, M., Lahssini, S., Santini, M., & Valentini, R. (2024). Comparative analysis of taper models for Pinus nigra Arn. using terrestrial laser scanner acquired data. *IForest*, *17*(4), 203–212. https://doi.org/10.3832/ifor4525-017

[3] Cattaneo, N., Puliti, S., Fischer, C., & Astrup, R. (2024). Estimating wood quality attributes from dense airborne LiDAR point clouds. *Forest Ecosystems*, *11*. https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100184

[4] Prendes, C., Cabo, C., Ordoñez, C., Majada, J., & Canga, E. (2021). An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in Pinus pinaster. *GIScience and Remote Sensing*, *58*(7), 1130–1150. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1972712

[5] Prendes, C., Canga, E., Ordoñez, C., Majada, J., Acuna, M., & Cabo, C. (2022). Automatic Assessment of Individual Stem Shape Parameters in Forest Stands from TLS Point Clouds: Application in Pinus pinaster. *Forests*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/f13030431

[6] Van Leeuwen, M., Hilker, T., Coops, N. C., Frazer, G., Wulder, M. A., Newnham, G. J., & Culvenor, D. S. (2011). Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: A review. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 261, Number 9, pp. 1467–1478). https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.032

[7] Windrim, L., & Bryson, M. (2020). Detection, segmentation, and model fitting of individual tree stems from airborne laser scanning of forests using deep learning. *Remote Sensing*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/RS12091469

6. Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto PLEC2023-010215, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto SHIFTIN (Towards Resilient, Sustainable, and Biodiversity-Friendly Transport Infrastructure), que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea, en virtud del acuerdo de subvención n.º 101319219.

CONAMA 2026