



ARTÍCULO

Variabilidad de la calidad de la madera en pie de *Pinus* spp. en localidades de los Andes colombianos.

Ricardo Andrés Oviedo-Celis^{1*} , Adriana Espinel-Cuadros¹ , Herwin Ramiro Roa-Caicedo¹, Ronald Alfonso Montañez¹ .

¹ Universidad Industrial de Santander, Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED, Programa de Ingeniería Forestal. Colombia. raovicel@correo.uis.edu.co; adriana2225600@correo.uis.edu.co; heroacai@correo.uis.edu.co; ronald.montanez@correo.uis.edu.co

*Autor para correspondencia: raovicel@correo.uis.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.666>

Recibido: 17.06.2026; Aceptado: 01.07.2026.

RESUMEN

La reforestación comercial constituye una actividad productiva orientada al uso de especies forestales de rápido crecimiento para el suministro de madera. Este estudio evaluó la variabilidad de propiedades de la madera en pie de especies del género *Pinus*, con el fin de determinar su calidad. El trabajo se desarrolló en tres municipios de Santander, Colombia, donde se estudiaron las especies *P. patula*, *P. maximinoi* y *P. tecunumanii* mediante un muestreo de campo realizado entre 2024 y 2025. La calidad de la madera fue estimada mediante una valoración ordinal (1 a 3) de nueve variables, integradas en un Índice General de Calidad de la Madera (IGCM), calculado a partir del promedio de las puntuaciones obtenidas en las variables individuales. Los datos fueron analizados mediante técnicas descriptivas y multivariadas para identificar patrones por especie y municipio. Las variables ramificación basal, rectitud del fuste, inclinación y espiralamiento del fuste presentaron puntuaciones óptimas, mientras que el 55 % de los individuos se agrupó en rangos intermedios de calidad. La comparación entre especies mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en el IGCM, mientras que entre municipios únicamente Zapatoca presentó diferencias significativas. El análisis multivariado evidenció que la reiteración, el ángulo y grosor de las ramas fueron variables con mayor incidencia sobre la calidad de la madera en pie. Se concluye que la región no presenta un óptimo de calidad en las plantaciones estudiadas; por tanto, esta evaluación constituye una herramienta útil para optimizar el manejo silvicultural en plantaciones forestales de la región andina colombiana.

Palabras clave: Desarrollo forestal, Gestión en masas coetáneas, Gobernanza forestal, Plantación forestal.

SUMMARY

Commercial reforestation is a productive activity focused on the use of fast-growing forest species to supply timber. This study evaluated the variability of the properties of standing timber from species of the genus *Pinus* in order to determine its quality. The study was conducted in three municipalities in Santander, Colombia, where the species *P. patula*, *P. maximinoi*, and *P. tecunumanii* were studied through field sampling carried out between 2024 and 2025. Wood quality was estimated using an ordinal scale (1 to 3) based on nine variables, which were incorporated into a General Wood Quality Index (GWQI) calculated as the average of the scores obtained for the individual variables. The data were analyzed using descriptive and multivariate techniques to identify patterns by species and municipality. The variables basal branching, stem straightness, stem inclination, and stem twist showed optimal scores, while 55% of the individuals fell into intermediate quality ranges. The comparison between species revealed significant differences ($p < 0.05$) in the IGCM, while among municipalities, only Zapatoca showed significant differences. The multivariate analysis showed that branch density, angle, and thickness were the variables with the greatest impact on the quality of standing timber. It is concluded that the region does not exhibit optimal quality in the plantations studied; therefore, this assessment serves as a useful tool for optimizing silvicultural management in forest plantations in the Colombian Andes.

Keywords: forestry development, even-aged management, forest governance, forest plantations.



INTRODUCCIÓN

Los recursos forestales son un activo ambiental estratégico para la sociedad, debido a los múltiples bienes y servicios ecosistémicos que aportan. Los bosques naturales cubren una extensión aproximada de 4,14 billones de hectáreas que suplen los requerimientos de madera a escala global (FAO, 2025). Sin embargo, la demanda creciente de esta materia prima a nivel global no puede ser totalmente suministrada por estos ecosistemas. Por tanto, promover cultivos forestales bajo modelos de manejo silvicultural sostenible es necesario para la conservación forestal.

Las plantaciones forestales son una estrategia económica de uso del suelo, cuyo fin es la producción de madera con calidad óptima para los mercados (Escobar-Sandoval *et al.*, 2018). El área forestal cultivada en Colombia comprende aproximadamente 549.611 ha, que contribuyen parcialmente al abastecimiento de la demanda nacional de madera (FEDEMADERAS, 2025). El uso y establecimiento de especies forestales introducidas ha permitido consolidar, con el paso del tiempo, núcleos de producción destinados al suministro de madera para las industrias del papel y la construcción (PROFOR, 2017). En este contexto, las especies del género *Pinus* han sido ampliamente promovidas debido a su alta capacidad de adaptación al suelo tropical, y a las condiciones climáticas en los Andes de Colombia, donde se han constituido como una de las principales alternativas de importancia económica forestal (UPRA, 2018).

La calidad de la madera es el resultado de la interacción entre las propiedades internas y el proceso de transformación (Valdés *et al.*, 2021); se trata de un concepto de amplio alcance para la ciencia forestal, cuya medición no responde a un único enfoque. Otras perspectivas asocian la calidad de la madera con el manejo silvicultural y las interacciones del árbol con las condiciones ambientales (Orozco *et al.*, 2016; Vignote *et al.*, s.f). Para el presente estudio, la calidad de la madera se aborda como una métrica de evaluación que integra atributos fenotípicos relevantes al momento de su clasificación con destino a la comercialización. Durante el ciclo productivo de una plantación forestal, los árboles desarrollan múltiples interacciones con las condiciones del entorno de crecimiento. Cuando estas interacciones no son monitoreadas ni manejadas adecuadamente, pueden generarse efectos directos sobre la calidad de la madera, reflejados en un desarrollo estructural irregular del cultivo forestal (Cuellar & Ramos, 2023). Lo anterior repercute negativamente en las proyecciones económicas del cultivo, debido a la presencia de defectos morfológicos como exceso de ramas, torceduras y formación irregular de nudos, variables consideradas estratégicas para la obtención de productos forestales de calidad en el mercado maderero (Nguyen *et al.*, 2014; Tenorio *et al.*, 2016; Murillo *et al.*, 2025).

En la región nororiental de Colombia, específicamente en el departamento de Santander, se han establecido áreas con especies del género *Pinus*. Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, estas plantaciones no han sido objeto de evaluación en atributos fenotípicos, a partir de los cuales se pueda establecer un referente de calidad de la madera en pie para la región. Lo anterior crea un sesgo de información, que puede con el paso del tiempo generar expectativas erradas para los reforestadores sobre la madera en crecimiento. Bajo este contexto, el objetivo de la presente investigación fue generar un referente de información sobre las variables de calidad de la madera en pie, de especies de rápido crecimiento del género *Pinus*, establecidas en Santander, con el fin de diagnosticar la realidad de estos cultivos y destacar la importancia del manejo silvicultural en la región andina de Colombia.

MATERIAL Y MÉTODO

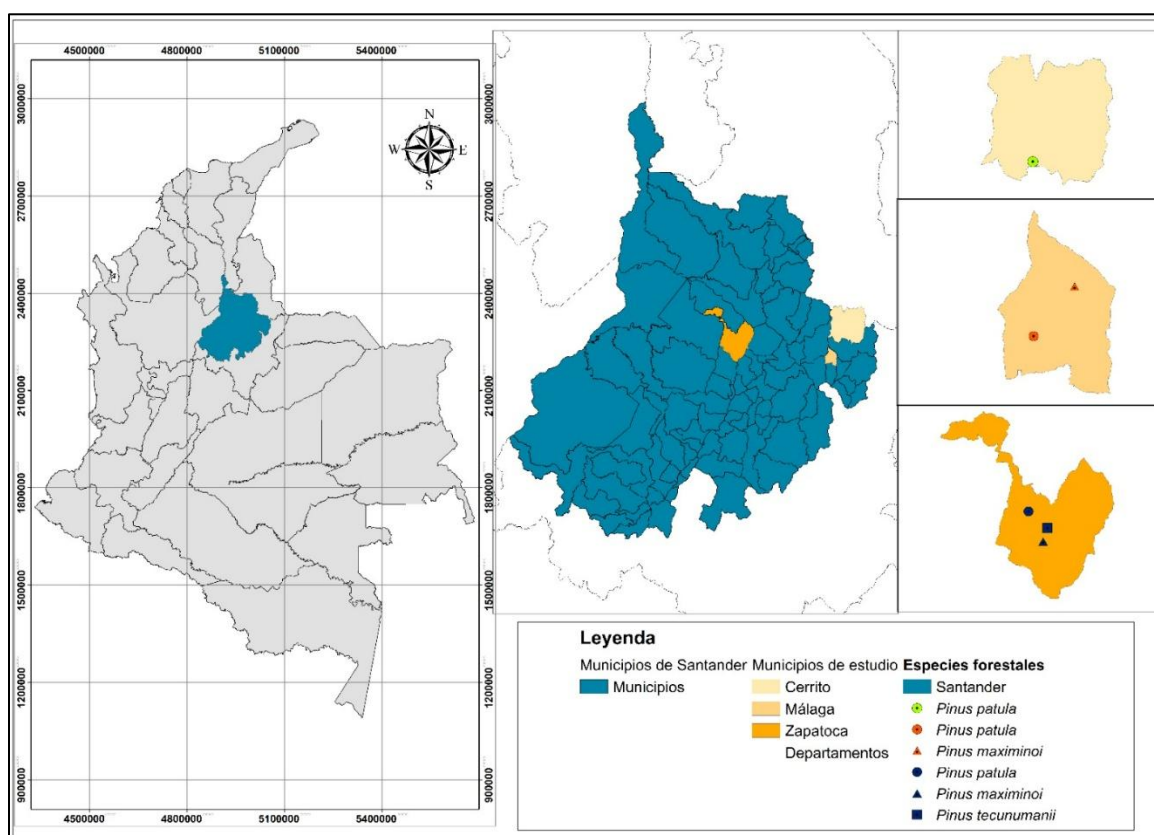
Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en tres localidades del departamento de Santander, ubicadas al nororiente de los Andes colombianos. La primera correspondió al municipio de Cerrito (C), donde se seleccionó para el muestreo una plantación de *Pinus patula* (Pp). La segunda área de estudio se ubicó en el municipio de Málaga (M), en el cual se seleccionaron plantaciones de *P. patula* (Pp) y *Pinus maximinoi* (Pm). Finalmente, en el municipio de Zapatoca (Z) se evaluaron plantaciones de *P. patula* (Pp), *P. maximinoi* (Pm) y *Pinus tecunumanii* (Pt). Las características de establecimiento y ubicación de estos sitios de muestreo se detallan en el Cuadro 1 y Figura 1.

Cuadro 1. Ubicación y características del establecimiento de plantaciones forestales del género *Pinus* spp en el área de estudio.

Especie	Municipio	Año de plantación	Espaciamiento	Contenedor	Coordenadas	Altitud msnm
<i>P. patula</i>	Zapatoca	2000	3x3 m	Pellet Jiffy*	6°50'17.80"N 73°18'27.54"O	2.115
<i>P. tecunumanii</i>	Zapatoca	2013	3x3 m	Pellet Jiffy	6°48'38.34"N 73°16'34.86"O	1.695
<i>P. maximinoi</i>	Zapatoca	2013	3x3 m	Pellet Jiffy	6°47'19.21"N 73°17'0.24"O	1.820
<i>P. patula</i>	Cerrito	2000	3x3 m	Bolsa	6°48'50.93"N 72°40'24.33"O	2.778
<i>P. maximinoi</i>	Málaga	2014	3x3 m	Pellet Jiffy	6°44'16.73"N 72°43'44.19"O	2.441
<i>P. patula</i>	Málaga	2010	3x3 m	Pellet Jiffy	6°42'29.66"N 72°45'13.05"O	2.770

* Pellet Jiffy corresponde al contenedor empleado para la propagación de la especie, fabricado con turba *Sphagnum*, envuelta en una muy fina malla biodegradable.

**Figura 1.** Localización de sitios de muestreo en los municipios de Zapatoca, Cerrito y Málaga, del departamento de Santander, Colombia.

Muestreo y Métricas de Campo

Los trabajos de campo se desarrollaron durante el segundo semestre de 2024 y el primer semestre de 2025. En este periodo se establecieron unidades de muestreo correspondientes a parcelas circulares de 6 m de radio, de acuerdo con la metodología propuesta por (Murillo & Camacho, 1997). El número de parcelas

implementadas en cada plantación se ajustó para obtener una intensidad de muestreo del 10 % del área total, garantizando así una adecuada representatividad y variabilidad.

Previo a establecer las parcelas, se realizaron ajustes en campo para corrección de pendiente y para disminuir el efecto borde al distribuir las unidades de muestreo dentro de las plantaciones. Las variables seleccionadas y la escala de valoración utilizada para evaluar la calidad de la madera en la zona de estudio se presentan en el **Cuadro 2**, y fueron adaptadas de la propuesta de (Murillo & Camacho, 1997). A partir de los registros de campo, se construyó un índice general de calidad de madera (IGCM), generado de los valores medios del conjunto de variables para cada árbol, que permitió cuantificar esta métrica para cada una de las especies como insumo descriptivo, empleando la **Expresión (1)**. Adicionalmente, se incluyeron el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (HT) como variables complementarias para los análisis.

Cuadro 2. Variables fenotípicas para evaluar la calidad de la madera de especies del género *Pinus* spp en Santander, Colombia.

Variable (Sigla)	Imagen	Descripción	Métricas
Ramificación basal (Rb)		Ramificación presentada por un árbol a menos de 1,3 metros de altura del fuste.	1: Tres o más ramificaciones. 2: Dos ramificaciones. 3: Sin ramificación.
Inclinación (In)		Ángulo de desviación del fuste principal, respecto a la vertical; asociado con torcedura.	1: Ángulo > 30°. 2: Ángulo entre 10° y 30°. 3: Ángulo < 10°.
Rectitud de fuste (Rf)		Grado de curvatura del fuste principal.	1: Fuste muy curvado. 2: Fuste con curvatura leve. 3: Fuste recto.

Daño
Mecánico
(Dam)



Lesiones físicas en el árbol causadas por manejo, transporte o factores externos.

- 1: Daño severo.
- 2: Daño leve.
- 3: Sin daño.

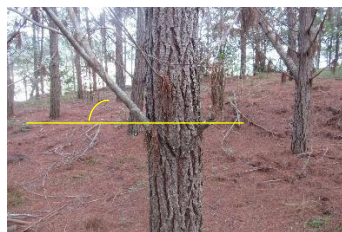
Grosor Rama
(Gr)



Diámetro en centímetros de las ramas ubicadas en el tercio inferior de la copa del árbol.

- 1: > 10 cm de diámetro.
- 2: Entre 5 y 10 cm de diámetro.
- 3: < 5 cm de diámetro.

Ángulo rama
(Ar)



Ángulo de inserción de las ramas en el fuste principal, tomando como plano horizontal el nivel del suelo.

- 1: Mayor a 60°
- 2: Entre 30° y 60°
- 3: Menor a 30°

Número de
trozas
(Nt)



Número de trozas de tres metros de largo, posibles de obtener desde el fuste del árbol.

- 1: Una sola troza de 3 m
- 2: Dos trozas de 3 m
- 3: Tres trozas de 3 m

Reiteración
(Re)



Distanciamiento
verticilos

entre

- 1: Corto e irregular distanciamiento entre ramas
- 2: Moderado distanciamiento entre ramas
- 3: Optimo distanciamiento entre ramas

Espiralamiento
del fuste (Ef)



Grado de incidencia del crecimiento, en forma de espiral del fuste principal.

- 1: Giros marcados en el tallo
- 2: Giros moderados en el tallo
- 3: Sin giros en el tallo

(Fuente: Adaptado de Murillo & Camacho, 1997)

$$IGCM = \frac{\sum V_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

V_i = Promedio de la variable i en cada árbol
 n = Total de variables evaluadas

Análisis Estadístico

El tratamiento estadístico de los datos incluyó inicialmente análisis descriptivos para el conjunto de variables evaluadas. Considerando la naturaleza ordinal de la escala de valoración utilizada y el incumplimiento de supuestos de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis (p -value <0,05), para identificar niveles de significancia por municipios y especies, y seguido se aplicó la prueba *post hoc* de Dunn, con el fin de identificar diferencias significativas entre grupos para estos dos factores. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de componentes principales para variables categóricas (CATPCA, por la sigla en inglés de *categorical principal components analysis*) con el propósito de explorar patrones de asociación entre las variables evaluadas. Todos los procesamientos estadísticos fueron construidos en el entorno RStudio (R Core Team, 2026) mediante los paquetes especializados *dplyr*, *FSA*, *Homals* y *ggplot2*.

RESULTADOS

Análisis Descriptivo de los Atributos de Calidad de Madera

El análisis exploratorio inicial de las variables evaluadas reveló tendencias diferenciadas en los atributos de calidad de la madera dentro de la región de estudio. En términos generales, no se observó un predominio absoluto de valoraciones óptimas en las plantaciones evaluadas. Sin embargo, variables como ramificación basal, rectitud y espiralamiento del fuste e inclinación presentaron los mayores porcentajes en la categoría de valoración más alta (**Cuadro 3**). En la categoría intermedia de evaluación, un conjunto de cinco variables agrupó las valoraciones más altas, donde destacaron las variables número de trozas, reiteración y ángulo de rama con las mayores frecuencias relativas. Por otro lado, dentro de la categoría de menor valoración, únicamente la variable reiteración presentó una proporción representativa de individuos en condición no favorable.

Cuadro 3. Distribución porcentual de atributos de calidad de madera en especies del género *Pinus*.

Variable	Escala de valoración		
	1 (%)	2 (%)	3 (%)
Ramificación basal	0,48	3,92	95,60
Inclinación	2,46	18,29	79,25
Rectitud de fuste	4,74	29,79	65,47
Daño Mecánico	16,61	45,68	37,71
Grosor Rama	17,65	49,22	33,12
Ángulo rama	24,73	51,10	24,17
Número de trozas	21,30	52,31	26,40
Reiteración	25,21	62,44	12,34
Espiralamiento del fuste	0,52	4,84	94,64

Nota: Los porcentajes fueron estimados a partir de un n=927 individuos registrados en la fase de campo.

Por último, la estimación de área basal (AB) en m² permitió confrontar el desarrollo y crecimiento. Además, se incluyó la altura total de los árboles de cada especie, en cada localidad. Respecto a estos parámetros dasométricos, en general, no se observó un patrón homogéneo ni por especie ni por municipio, situación que se refleja en los valores medios señalados en las **Figuras 2A y 2B**. Al contrario de lo que ocurre con la variable altura total, donde no se evidencia un patrón diferenciador, en el caso del área basal se observa que *P. maximinoi* y *P. patula* se diferencian claramente de *P. tecunumanii*; los primeros, con valores de área basal individual promedio por árbol superiores a 0,15 m², son un 44 % superiores a lo observado en *P. tecunumanii*. El análisis por municipio destacó a Málaga, con un área basal de 0,27 m²/árbol, la que supera a Zapatoca en un 60 %; respecto a la altura, lo observado para los municipios fue similar a lo revelado por especie.

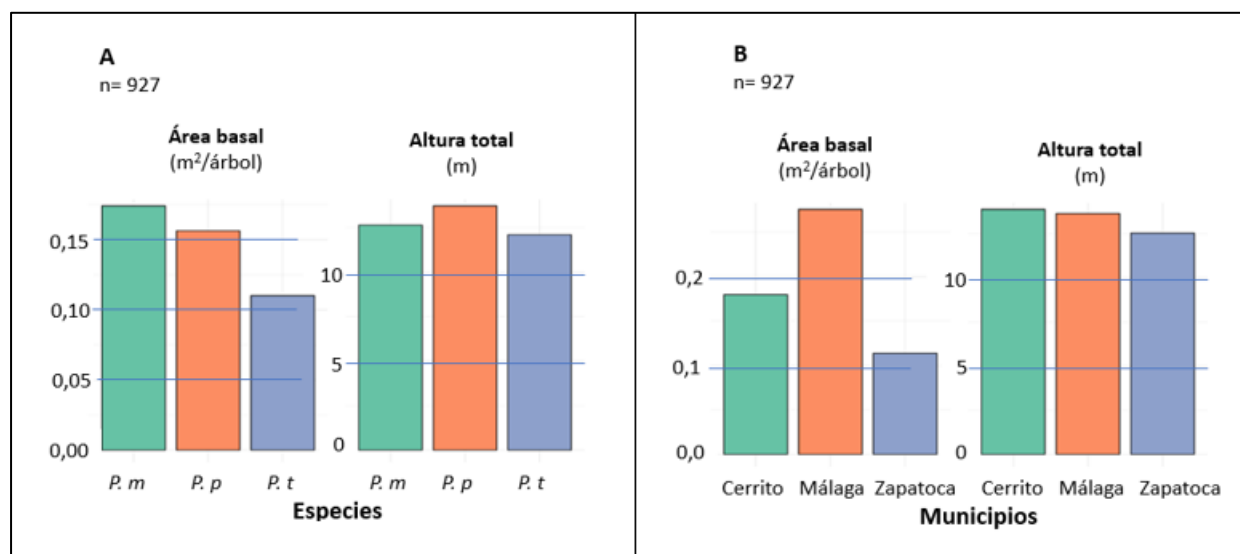


Figura 2. Valores medios de área basal (m²/árbol) y altura total (m) según especies (A) y municipios (B).
(*P. m* = *Pinus maximinoi*; *P. t* = *P. tecunumanii*; *P. p* = *P. patula*)

Comparación del Índice General de Calidad de la Madera en Pie entre Especies y Municipios

Entre especies, el análisis de *Kruskal–Wallis* reveló diferencias significativas en el IGCM (*p-value* < 0,001). La prueba *post hoc* de *Dunn* mostró diferencias significativas entre todos los pares de comparación. Los mayores valores promedio se registraron en *P. maximinoi* (2,4) y *P. patula* (2,3), mientras que *P. tecunumanii*

presentó el menor valor promedio del índice; incluso con reportes de valoración del índice desde 1.0. En términos generales, esta última especie evidenció una tendencia hacia calificaciones inferiores de calidad de la madera, ubicándose por debajo del nivel intermedio de valoración del IGCM (**Figura 3A**).

A nivel de municipios, el análisis del IGCM basado en las comparaciones múltiples de *Dunn*, evidenció la formación de dos grupos estadísticamente diferenciados. Por un lado, los municipios de Cerrito y Málaga no presentaron diferencias significativas entre sí, mostrando valores medios similares del índice. Por otro lado, Zapatoca registró valores significativamente inferiores de IGCM, diferenciándose de ambos municipios. Estos resultados indican una tendencia hacia una menor calidad de madera en los individuos evaluados en Zapatoca en comparación con los procedentes de Cerrito y Málaga (**Figura 3B**).

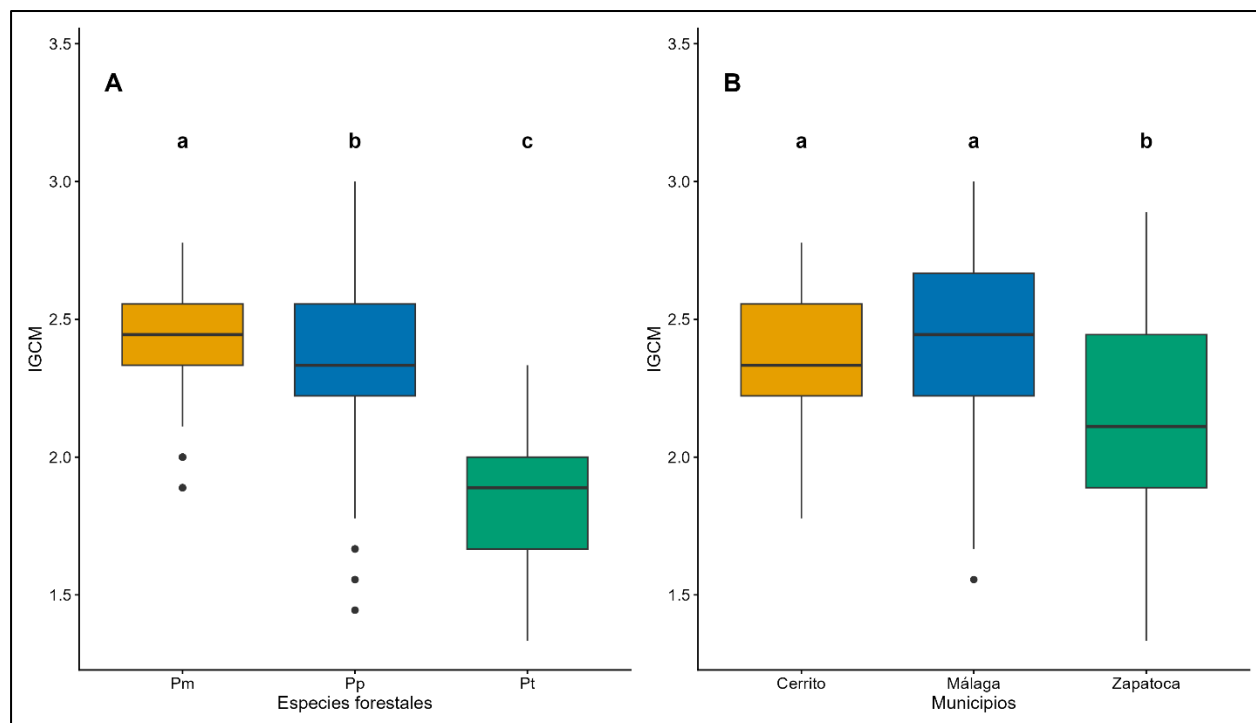


Figura 3. Comparación del Índice General de Calidad de Madera (IGCM) entre especies forestales (A) y municipios de estudio (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (p -value < 0,05). (*P. m* = *Pinus maximinoi*; *P. t* = *P. tecunumanii*; *P. p* = *P. patula*).

Estructura Multivariada de las Variables de Calidad de Madera

El análisis CATPCA permitió explorar la estructura multivariada de los atributos de calidad de la madera evaluados en las especies de *Pinus* estudiadas. Las dimensiones 1 y 2 presentaron autovalores de 0,0150 y 0,0168 respectivamente, evidenciando una baja dispersión general de los datos y una alta concentración de observaciones en categorías similares de calidad. La contribución de las variables a la configuración de los ejes mostró patrones diferenciados (**Figura 4A**). En la primera dimensión destacaron los atributos relacionados con grosor de rama (Gr), ángulo de rama (Ar) y reiteración (Re), mientras que la segunda dimensión estuvo principalmente asociada con número de troza (Nt), inclinación (In), daño mecánico (Dam) y rectitud de fuste (Rf). En contraste, la ramificación basal (Rb) y espiralamiento del fuste (Ef) presentaron una menor contribución relativa a la estructura multivariada observada.

La distribución de los individuos por especie reveló un amplio solapamiento en el espacio definido por las dos primeras dimensiones (**Figura 4B**), lo que indica una respuesta similar de los atributos de calidad evaluados. No obstante, se observaron tendencias de agrupamiento que sugieren diferencias en la

expresión conjunta de algunas variables entre las especies, particularmente en aquellos asociados con la primera dimensión. De manera similar, la representación por municipio mostró una elevada superposición entre localidades (**Figura 4C**), lo que indica que las áreas de estudio evaluadas compartieron patrones generales de calidad de madera. Sin embargo, la dispersión observada en cada municipio evidencia variabilidad intralocal o intraespecífica, que podría estar vinculada a factores de sitio, entre ellos: el rango altitudinal (2.441-2.778 msnm, Málaga-Cerrito); el manejo o desarrollo individual de los árboles en los estadios iniciales de crecimiento, debido a los distintos contenedores (pellets y bolsas) que se usaron para producir sus plantas; y los periodos de siembra de los árboles plantados.

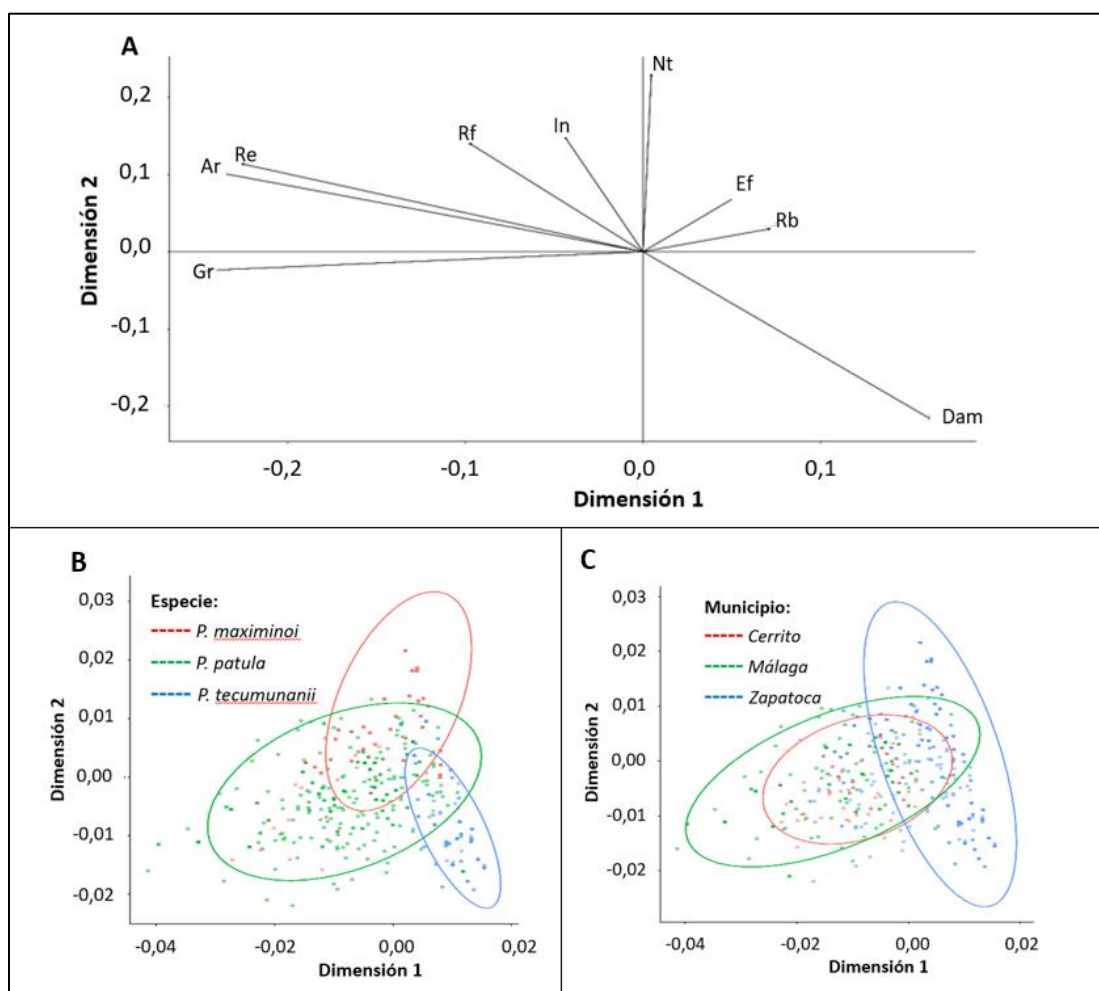


Figura 4. Representación multivariada de los atributos de calidad de madera mediante análisis CATPCA. (A) Contribución de las variables evaluadas, (B) distribución de individuos por especie y (C) distribución de individuos por municipio.

DISCUSIÓN

La calidad observada de la madera en pie indica que las especies de pino empleadas en los procedimientos de reforestación exhiben respuestas distintas en los atributos evaluados en la presente investigación. Este comportamiento estaría asociado inicialmente a características genéticas propias de cada especie, así como a las condiciones edáficas y al manejo silvicultural implementado durante el ciclo productivo de las plantaciones (Schimleck *et al.*, 2018; Castor *et al.*, 2024). Tradicionalmente, las evaluaciones de calidad de madera en coníferas se han desarrollado sobre material aserrado, posterior al aprovechamiento forestal,

considerando principalmente propiedades derivadas de la anisotropía de la madera, diámetros con y sin corteza, y grosor de tabla, entre otros (Rascón-Solano *et al.*, 2023). No obstante, este enfoque puede generar para los reforestadores menores ganancias al momento de comercializar la madera, debido a que la valoración se realiza a criterio del comprador a partir de una transformación inicial.

La valoración de calidad de la madera a partir de variables como daño mecánico, grosor de rama, ángulo de rama, número de trozas y reiteración reveló un panorama subóptimo para los propietarios de las plantaciones forestales evaluadas. Este subconjunto de atributos presentó valoraciones intermedias dentro de la escala empleada, lo que, coincidiendo con lo informado por Corvalán (2020), pone de manifiesto individuos multinodales, con posibles deficiencias de carácter silvicultural durante el periodo de desarrollo de las plantaciones. Estos resultados sugieren además implicaciones negativas sobre la proyección productiva de los rodales, debido a que tales atributos pueden limitar el crecimiento sostenido y la conformación estructural de los individuos. Este comportamiento fue igualmente consistente con los valores promedio de área basal registrados en el estudio, resultados que coinciden con lo reportado por Medrado *et al.* (2023), quienes destacan la importancia del manejo silvicultural en la producción de madera de calidad en proyectos forestales.

El IGCM mostró una mayor variabilidad entre especies que entre municipios. En este contexto, *P. tecunumanii* presentó las menores puntuaciones del índice, comportamiento que podría explicarse parcialmente por tratarse de una especie de incorporación más reciente en los programas de reforestación de la zona. Lo anterior también sugiere que aún no existe un patrón completo de adaptación a las condiciones de oferta ambiental presentes en las áreas evaluadas. Los valores obtenidos para el índice también podrían estar asociados a intervenciones silviculturales tardías o insuficientes, particularmente en actividades como poda de formación, práctica que Miao *et al.* (2025) reportan como fundamental para mejorar la calidad maderera de las plantaciones de especies del género *Pinus*. En esta misma línea, retrasos en las intervenciones silviculturales podrían explicar el comportamiento observado en *P. maximinoi*, especie para la cual se han reportado diámetros de rama no superiores a 2 cm, como valores ideales para la obtención de madera de calidad en plantaciones forestales de países centroamericanos como Guatemala (INAB, 2017). Estudios en *P. patula*, efectuados por Escobar-Sandoval *et al.* (2018) en México, reportan diámetros de rama de 2,4 hasta 7,3 cm en plantaciones de 8 años, establecidas a 2,5 x 2,5 m de distanciamiento, un patrón de plantación que pudo explicar tal respuesta, pero que dista de las características de establecimiento y tiempo de siembra acá evaluado. Sin embargo, en la presente investigación, dichos valores no fueron superados en la gran mayoría, situación que posiblemente contribuyó a un IGCM promedio de 2,5 para estas especies.

El análisis multivariado implementado en el estudio reveló la incidencia diferencial de algunos atributos sobre la calidad de la madera en pie. Específicamente, variables como grosor de rama, ángulo de rama y reiteración presentaron una mayor contribución a la estructura multivariada observada, explicando en gran proporción la variabilidad del IGCM registrado entre individuos y especies. Estos resultados validan la importancia de las intervenciones silviculturales orientadas al control de la carga vegetal que conforma la copa de los árboles plantados durante el turno proyectado, aspecto que Pastor-Martínez *et al.* (2024) destacan como importante de realizar en el primer tercio de fuste, donde demostraron efectos positivos para la producción de madera de calidad en especies de coníferas como las acá evaluadas. Asimismo, la asociación observada entre reiteración y ángulo de la rama sugiere un incremento en la formación de nudos muertos en la madera, condición que afecta las propiedades mecánicas y, por ende, su valor comercial (Wang *et al.*, 2025). Estos resultados evidencian posibles deficiencias en el manejo silvicultural de las plantaciones evaluadas, situación que podría explicar los retrasos en el crecimiento sostenido de los individuos, comportamiento igualmente consistente con los valores de área basal estimados, los que se consideran bajos para la edad y las especies evaluadas.

Finalmente, los análisis multivariados realizados a nivel de especies y municipios no evidenciaron patrones claramente diferenciados respecto a la calidad de la madera en la región evaluada. En este sentido, los atributos analizados mostraron comportamientos similares entre las especies de coníferas y las localidades donde fueron establecidas las plantaciones, lo que sugiere la existencia de factores comunes asociados al desarrollo de los rodales. Estos resultados podrían indicar limitaciones en la implementación de criterios

técnicos de manejo silvicultural dentro de los predios evaluados, aspecto que posiblemente influyó sobre la expresión homogénea de los atributos de calidad registrados en esta investigación.

CONCLUSIONES

La evaluación de la calidad de la madera debería constituir una práctica transversal durante el ciclo productivo de plantaciones forestales establecidas con especies de rápido crecimiento, como las coníferas del género *Pinus*. El desarrollo de esta investigación demostró que el conjunto de variables seleccionadas representa una herramienta útil para describir el estado de la madera en pie en plantaciones localizadas en municipios de Santander, Colombia, donde fueron evaluadas plantaciones de *P. patula*, *P. maximinoi* y *P. tecunumanii*, especies para las cuales existe limitada información silvicultural en la región. Las métricas de calidad obtenidas se consolidan como un referente regional para fortalecer la toma de decisiones en la administración forestal, resaltando la importancia del manejo silvicultural sobre la producción de madera de calidad. Asimismo, el estudio evidenció que la calidad de la madera puede ser estimada mediante un índice general que integra atributos relevantes asociados a la obtención de productos maderables con características óptimas para mercados locales y regionales.

Finalmente, el análisis multivariado permitió establecer una aproximación al comportamiento de las especies forestales evaluadas y al estado actual de la calidad de la madera en pie en los municipios seleccionados. No obstante, los resultados obtenidos no deben asumirse únicamente como información base, sino como un insumo técnico para que reforestadores y productores forestales puedan alcanzar un óptimo desarrollo y crecimiento de nuevas plantaciones. De esta manera, la gestión forestal podrá incorporar herramientas metodológicas dirigidas a incrementar la productividad, optimizar la calidad de las plantaciones y fortalecer la cadena de valor forestal de las coníferas en los Andes de Colombia, donde se han constituido como una fuente importante de madera a nivel nacional.

AGRADECIMIENTOS

A los propietarios de fincas en los municipios de estudio, y especialmente al Dr. Carlos Mantilla en Zapatoca, quien durante años facilitó el ingreso a las plantaciones para llevar a cabo prácticas académicas. Además, a los estudiantes del curso Viveros y Plantaciones del programa de Ingeniería Forestal 2024 de la Universidad Industrial de Santander, por su contribución en la colecta de datos en campo.

REFERENCIAS

- Castor, T., dos Santos, V., de Souza, M., Marques, N., Schumacher, M., Stape, J. & Baptista, G. (2024). The impact of age and forestry practices on the wood quality of *Pinus taeda* L. grown in different sites in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 562. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121898>
- Corvalán, P. (2020). Consideraciones silvícolas para la producción de postes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(2): 375-391.
- Cuellar, J. & Ramos, H. (2023). Manejo silvicultural de plantaciones maderables para mejorar la calidad de la madera. Instituto Regional de Desarrollo, Universidad Nacional La Molina. Lima, Perú.
- Escobar-Sandoval, M., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S. & Borja-de la Rosa, A. (2018). Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y bosques*, 24(2), e2421595. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), (2025). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2025. Roma. 214 pp. <https://doi.org/10.4060/cd6709es>
- FEDEMADERAS (Federación Nacional de Industriales de la Madera), (2025). Boletín estadístico forestal. Bogotá. Colombia.

- INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2017). Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H.E. Moore); paquete tecnológico forestal. Guatemala. 37 p.
- Medrado, P., de Resende, A., Tavares, N., Torres, C., Alves, D., Camargo, C., Sverzut, H. *et al.* (2023). Potential native timber production in tropical forest restoration plantations. Perspectives in Ecology and Conservation, N° 21. Pp: 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.002>
- Miao, Z., Zhao, X., Jiang, Y., Dong, L. & Li, F. (2025). Survival modeling of branch-knot developmental dynamics in Korean Pine plantations: Linking climate, region, and artificial pruning. Forest Ecology and Management, 597, 123160. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123160>
- Murillo, O. & Camacho, P. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas. Agronomía Costarricense, 21(2): 189-206.
- Murillo, O., Padilla, M. & Jara, H. (2025). Evaluación de la plantación forestal. Costa Rica.
- Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D. & Herbohn, J. (2014). Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. Forest Ecology and Management, N° 334. Pp:106-113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>
- Orozco, R., Hernández, J., Nájera, J., Domínguez, P., Goche, J., López, P. & Corral, J. (2016). Rendimiento en calidad de la madera aserrada de pino. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(36): 37-50. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000400037
- Pastor-Martínez, U., Velázquez-Martínez, A. & Gil-Vera, J. (2024). Efecto de podas en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en el ejido Llano Grande, Chignahuapan, Puebla. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 30(1): rrchscfa202210077. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.077>
- PROFOR (Programa sobre los bosques). (2017). Situación actual y potenciales de fomento de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia. Bogotá, Colombia
- R Core Team (2026). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rascón-Solano, J., Aguirre-Calderón, O., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. & Nájera-Luna, J. (2023). Rendimiento y distribución de clases de madera aserrada de pinos del norte de México. Colombia Forestal, 26(2): 60-76. <https://doi.org/10.14483/2256201X.20082>
- Schimleck, L., Antony, F., Dahlen, J. & Moore, J. (2018). Wood and Fiber Quality of Plantation-Grown Conifers: A Summary of Research with an Emphasis on Loblolly and Radiata Pine. Forests, 9(6): 298. <https://doi.org/10.3390/f9060298>
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C. & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. Bosque, 37(1): 71-84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100008>
- UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria). (2018). Lineamientos de política: Plantaciones forestales con fines comerciales para la obtención de madera y su cadena productiva. Bogotá. https://upra.gov.co/sites/default/files/2025-07/201802_lineamientos.pdf
- Valdés, R., Alvarez, D. & Fernández, R., (2021). Análisis de la calidad superficial de diferentes maderas. Avances, 23(2): 163-174.
- Vignote, S., Martínez-Rojas, I., & Villasan, A. (s.f). Silvicultura y calidad de madera. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Economía y Gestión Forestal Santiago
- Wang, P., Liu, G., Li, F., Li, S., Milani, G. & Abruzzese, D. (2025). Assessment of Knot-Induced Degradation in Timber Beams: Probabilistic Modeling and Data-Driven Prediction of Load Capacity Loss. Buildings, 15, 2058. <https://doi.org/10.3390/buildings15122058>