

**LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias
Sociales y Humanidades, Asunción, Paraguay.**

ISSN en línea: 2789-3855, 2025, Volumen VI

Desarrollo de un modelo dendrométrico no destructivo para estimar el área basal en *Gmelina arborea*

Development of a non-destructive dendrometric model to estimate
basal area in *Gmelina arborea*

Kevin Gregorio Álava Ganchozo

alavaganchozo0344@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-9767-9684>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Quevedo – Ecuador

Damariz Julexy Zambrano Plaza

julexy.zambrano.plaza@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-2639-0609>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Quevedo – Ecuador

Erick Oswaldo Tapia Palomino

erick.tapia95.et@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-6106-9191>
Universidad Técnica Estatal de Quevedo
Quevedo – Ecuador

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i5.4665>

Artículo recibido: 26 de junio de 2025
Aceptado para publicación: 17 de octubre de 2025.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.


Redilat
Red de Investigadores
Latinoamericanos

NÚMERO

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v6i5.4665>

Desarrollo de un modelo dendrométrico no destructivo para estimar el área basal en *Gmelina arborea*

Development of a non-destructive dendrometric model to estimate basal area in *Gmelina arborea*

Kevin Gregorio Álava Ganchozo

alavaganchozo0344@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-9767-9684>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Damariz Julexy Zambrano Plaza

julexy.zambrano.plaza@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-2639-0609>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Erick Oswaldo Tapia Palomino

erick.tapia95.et@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-6106-9191>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Artículo recibido: 26 de junio de 2025. Aceptado para publicación: 17 de octubre de 2025.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

El estudio desarrolló un modelo dendrométrico no destructivo para estimar el área basal en plantaciones jóvenes de *Gmelina arborea* a partir de mediciones de copa obtenidas mediante fotogrametría aérea con UAV. Se aplicó un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental, transversal y correlacional, evaluando 323 individuos distribuidos en tres parcelas de 2000m² en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. En campo se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y se calculó el área basal; de manera paralela, se capturaron imágenes aéreas con un dron DJI Mavic 2 Pro, generando ortomosaicos y modelos digitales de superficie procesados en Agisoft Metashape y ArcGIS Pro para determinar el diámetro y área de copa de cada árbol. Los análisis estadísticos incluyeron descriptivos, prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov, correlación de Spearman y regresión lineal. Los resultados evidenciaron una fuerte correlación positiva entre área de copa y área basal ($r = 0,888$; $p < 0,01$). El modelo de regresión lineal explicó el 78,4 % de la variabilidad del área basal, con error estándar reducido, indicando un ajuste robusto. Se concluye que el área de copa obtenida mediante UAV constituye un predictor confiable del área basal en plantaciones jóvenes de *G. arborea*, permitiendo estimaciones rápidas, precisas y no destructivas. El modelo optimiza el monitoreo forestal, reduce costos y tiempos de inventario, y minimiza impactos sobre los ecosistemas.


Palabras clave: *gmelina arborea*, área basal, fotogrametría aérea, UAV, modelo dendrométrico

Abstract

This study developed a non-destructive dendrometric model to estimate basal area in young *Gmelina arborea* plantations from canopy measurements obtained through aerial photogrammetry with UAVs.

A quantitative approach was applied, with a non-experimental, cross-sectional, and correlational design, evaluating 323 individuals distributed across three 2000 m² plots in the province of Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. In the field, diameter at breast height (DBH) was measured and basal area was calculated; in parallel, aerial images were captured with a DJI Mavic 2 Pro drone, generating orthomosaics and digital surface models processed in Agisoft Metashape and ArcGIS Pro to determine the diameter and canopy area of each tree. Statistical analyses included descriptive analyses, the Kolmogorov-Smirnov normality test, Spearman correlation, and linear regression. The results showed a strong positive correlation between canopy area and basal area ($r = 0.888$; $p < 0.01$). The linear regression model explained 78.4% of the variability in basal area, with a small standard error, indicating a robust fit. It is concluded that canopy area obtained by UAV is a reliable predictor of basal area in young *G. arborea* plantations, allowing rapid, accurate, and non-destructive estimates. The model optimizes forest monitoring, reduces costs and inventory times, and minimizes impacts on ecosystems.

Keywords: gmelina arborea, basal area, aerial photogrammetry, UAV, dendrometric model

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Álava Ganchozo, K. G., Zambrano Plaza, D. J., & Tapia Palomino, E. O. (2025). Desarrollo de un modelo dendrométrico no destructivo para estimar el área basal en *Gmelina arborea*. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 6 (5), 1178 – 1189.
<https://doi.org/10.56712/latam.v6i5.4665>

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico ha transformado múltiples disciplinas del conocimiento humano, incluido el ámbito forestal, donde se han superado las limitaciones asociadas al trabajo de campo tradicional, como la inaccesibilidad del terreno, los altos costos de monitoreo y la falta de precisión de los métodos convencionales (Banu et al., 2016). En este contexto, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones) se ha consolidado como una herramienta innovadora, capaz de proporcionar información de alta resolución en cortos periodos de tiempo y con gran flexibilidad espacial. Estas tecnologías han sido aplicadas con éxito en el análisis de la estructura del dosel, la detección de perturbaciones naturales, la planificación de la gestión forestal y la elaboración de inventarios más precisos y actualizados (Gallardo et al., 2020).

La integración de UAV con sistemas de información geográfica (SIG), inteligencia artificial y algoritmos de análisis espacial ha permitido procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones complejos en los ecosistemas forestales (Buchelt et al., 2024). Estas innovaciones no solo optimizan la toma de decisiones, sino que también apoyan estrategias de conservación y recuperación de áreas degradadas, lo que demuestra la relevancia de incorporar nuevas tecnologías en la investigación forestal (Medina et al., 2021).

Los inventarios forestales constituyen instrumentos esenciales para conocer la cantidad, calidad y estado actual de los recursos forestales, sirviendo como base para su aprovechamiento y conservación sostenible (Peñalver et al., 2021). No obstante, los métodos tradicionales empleados en su levantamiento son excesivamente lentos y costosos (González et al., 2005). Por ello, se han incorporado nuevas alternativas como fotografías aéreas, ortomosaicos e imágenes satelitales, que, combinadas con el reconocimiento de campo, permiten estimaciones más rápidas y precisas de las variables dasométricas.

En este marco, los UAV han despertado un creciente interés debido a sus múltiples aplicaciones y a la reducción progresiva de sus costos de implementación, lo que ha ampliado su accesibilidad en investigaciones forestales (Baena et al., 2018; Reyes et al., 2022). Entre sus principales ventajas destacan la capacidad de obtener ortomosaicos de alta resolución y controlar la adquisición temporal de datos, lo que facilita estudios comparativos en diferentes intervalos de tiempo (Tang & Shao, 2015). Asimismo, han demostrado utilidad en la identificación de especies a nivel individual, la evaluación de la cobertura vegetal, la caracterización estructural y la elaboración de inventarios en distintos tipos de bosques (González et al., 2020).

Particularmente, en plantaciones de *Gmelina arborea*, especie de rápido crecimiento y alto valor comercial, los UAV han sido empleados para la captura de fotografías aéreas orientadas a estimar el área de copa de los árboles en diferentes parcelas (Ahrwar et al., 2019). Estos datos ofrecen una alternativa no destructiva a los métodos convencionales de cálculo del área basal, los cuales requieren medir el diámetro a la altura del pecho (DAP) mediante cinta diamétrica (Hernández et al., 2018). La posibilidad de correlacionar el área de copa con el área basal permite diseñar modelos predictivos confiables, que optimizan la eficiencia del monitoreo en plantaciones jóvenes y contribuyen al manejo sostenible de los recursos forestales.

La estimación del área basal es un parámetro fundamental en los inventarios forestales, ya que proporciona información sobre la estructura, biomasa y productividad de los bosques. Tradicionalmente, su cálculo se ha basado en mediciones directas del diámetro a la altura del pecho (DAP), lo que requiere métodos invasivos, consumo intensivo de tiempo y, en algunos casos, intervenciones destructivas que comprometen la integridad de los individuos muestreados (Huspek et al., 2023). En este contexto, la búsqueda de alternativas no destructivas se ha consolidado como una línea de investigación prioritaria en la gestión forestal sostenible, en particular en especies de rápido

crecimiento como *Gmelina arborea*, de alto valor económico y ecológico en regiones tropicales (Brūmelis et al., 2020).

Las variables morfométricas de la copa, tales como el diámetro y el área proyectada, se han posicionado como indicadores confiables del crecimiento estructural del árbol. Diversos estudios han demostrado su correlación con el área basal y la biomasa aérea, lo que convierte a estas métricas en sustitutos válidos de las mediciones directas (Hemery et al., 2005; Malleux, 2007; Scientific Electronic Archives, 2022). La ventaja de estas variables radica en que pueden obtenerse mediante observaciones aéreas o sensores remotos, evitando la necesidad de trabajo destructivo en campo y permitiendo un monitoreo más ágil en grandes extensiones.

En los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sensores LiDAR ha revolucionado los inventarios forestales. Estas tecnologías facilitan la detección individual de árboles, la delimitación de copas y la estimación precisa de variables como altura, volumen y área basal (Boeno et al., 2021; Frank et al., 2020). La combinación de UAV y fotogrametría digital ha mostrado resultados promisorios en plantaciones tropicales, donde la densidad y heterogeneidad estructural suelen representar un desafío para los métodos tradicionales (Hernández-Cole et al., 2021).

Particularmente, investigaciones recientes han resaltado la utilidad de los modelos alométricos no destructivos para estimar la biomasa y el área basal en especies tropicales, validando la integración de variables de copa y fuste en ecuaciones predictivas (Huspek et al., 2023; Zheng et al., 2023). Además, los avances en algoritmos de aprendizaje profundo aplicados al análisis de nubes de puntos LiDAR han permitido automatizar la caracterización forestal con altos niveles de precisión (Wielgosz, et al., 2023).

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo dendrométrico no destructivo para estimar el área basal en *Gmelina arborea*, a partir de mediciones de copa obtenidas mediante técnicas de fotogrametría aérea. Se plantea que la incorporación de estos métodos contribuye a optimizar la eficiencia de los inventarios, minimizar costos operativos y fortalecer la sostenibilidad en la gestión de plantaciones forestales.

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en una plantación de *Gmelina arborea* en una parroquia de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, ubicada en la zona central del Ecuador, con coordenadas 79° 16' 35,83" O y 0° 24' 56,09" S. La zona de estudio se encuentra a una altitud que varía entre los 289 y 2076 m s.n.m., con una temperatura promedio de 19 a 26 °C.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, sustentado en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de mediciones aéreas de copa y registros de área basal en campo. El propósito fue establecer correlaciones estadísticas que permitieran desarrollar un modelo dendrométrico no destructivo para la especie *G. arborea*.

Se empleó un diseño no experimental, transversal y correlacional, debido a que las variables se midieron en un único momento, sin manipulación de los árboles, con el objetivo de analizar la relación entre el área de copa y el área basal. Asimismo, la investigación tuvo un carácter exploratorio y descriptivo, lo que permitió examinar patrones de comportamiento en plantaciones jóvenes.

La población de estudio estuvo constituida por individuos de *G. arborea* de 18 meses de edad, distribuidos en tres parcelas temporales de aproximadamente 2000 m² (44,75 m por lado), delimitadas tras un recorrido previo para evitar zonas de borde, pendientes pronunciadas y áreas de amortiguamiento. En total se evaluaron 323 individuos: 110 en la primera parcela, 111 en la segunda y 102 en la tercera.

Los instrumentos de recolección de datos aplicados se mencionan a continuación:

Campo: se emplearon cinta diamétrica y cinta métrica para medir la circunferencia a la altura del pecho (1,30 m) y calcular el diámetro (DAP) y el área basal mediante las fórmulas propuestas por Imaña (2011). También se utilizaron estacas, aerosol y GPS Garmin eTrex 20 para georreferenciar las parcelas y puntos de control.

Aéreo y digital: se utilizó un dron DJI Mavic 2 Pro para la captura de imágenes aéreas, procesadas con Agisoft Metashape para generar ortomosaicos y modelos digitales de superficie. Posteriormente, los ortomosaicos en formato TIF se procesaron en ArcGIS Pro 3.0, aplicando técnicas de segmentación (SAM) para obtener el diámetro y área de copa de cada árbol.

Se establecieron cinco puntos de control por parcela mediante GPS. El dron se programó para vuelos a 40m de altura, con seis pasadas y un total aproximado de 160 imágenes por recorrido. El tiempo promedio de vuelo fue de 7 minutos, cubriendo cerca de 9000 m² con un traslape frontal del 80 % y lateral del 70 %, obteniéndose un GSD de 0,91 cm/píxel y una velocidad de 14 km/h. Las imágenes fueron procesadas en Agisoft Metashape para generar ortomosaicos y nubes de puntos, que posteriormente fueron analizadas en ArcGIS Pro para la delimitación de copas. Paralelamente, en campo se midió el DAP de cada individuo para validar las mediciones aéreas.

Las variables de estudio fueron las siguientes:

Independiente: área de copa (m²), calculada a partir de ortomosaicos.

Dependiente: área basal (m²/ha), estimada a partir del DAP a 1,30 m. Además, se analizaron los diámetros correspondientes como variables auxiliares.

Los datos fueron procesados en IBM SPSS Statistics 22. Inicialmente se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, percentiles e histogramas) para identificar tendencias y valores atípicos. Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov y se calculó el coeficiente de correlación de Spearman para verificar la relación entre el área de copa y el área basal. Finalmente, se construyeron modelos de regresión lineal y alométricos para predecir el área basal a partir de las variables de copa, evaluando la bondad de ajuste mediante R², SEE y criterios de información (AIC y BIC).

El estudio se realizó bajo un enfoque de sostenibilidad y respeto a la integridad de los individuos muestreados, evitando cualquier daño destructivo en los árboles. Se contó con la autorización de los propietarios de la plantación y se respetaron las normativas vigentes para el uso de UAV en investigación forestal. Asimismo, se garantizó la transparencia en la recolección, procesamiento y análisis de los datos, así como la correcta citación de fuentes bibliográficas.

RESULTADOS

Estadísticos descriptivos

Tabla 1

Estadísticos descriptivos del diámetro de copa y del diámetro de fuste

Variable	N	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
Diámetro de copa (m)	323	3,10	0,66	1,67	5,08
Diámetro de fuste (m)	323	0,094	0,019	0,047	0,160

Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m – metros.

El diámetro de copa presentó una media de 3,10 m, con valores entre 1,67 y 5,08 m, lo que refleja la heterogeneidad natural de los individuos en etapa juvenil. El diámetro de fuste registró una media de 0,094 m y un rango de 0,047 a 0,160 m, mostrando mayor uniformidad relativa. La dispersión evidenciada en ambas variables responde a la irregularidad morfológica típica de plantaciones jóvenes de 18 meses.

Tabla 2

Estadísticos descriptivos del área de copa y del área basal

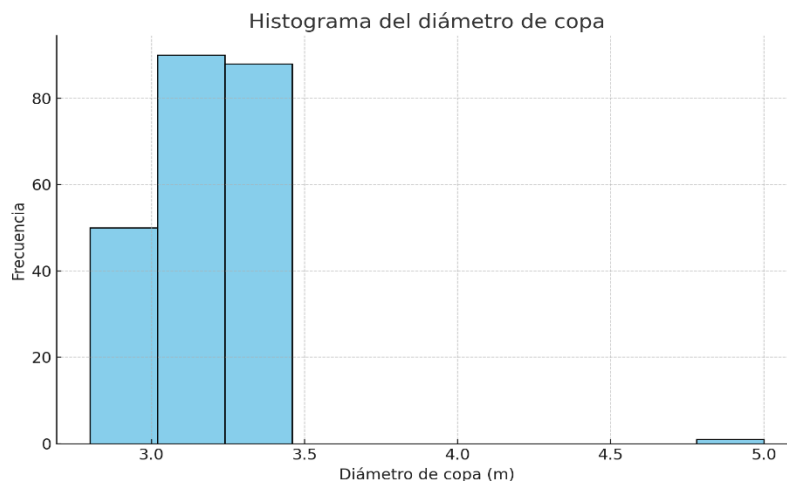
Variable	N	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
Área de copa (m ²)	323	7,88	3,32	2,20	20,23
Área basal (m ²)	323	0,0072	0,0029	0,0017	0,0202

Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m – metros.

El área de copa mostró una media de 7,88 m², con valores que oscilaron entre 2,20 y 20,23 m², lo que indica una alta variabilidad estructural. Por su parte, el área basal presentó una media de 0,0072 m² y un rango entre 0,0017 y 0,0202 m². Esta amplitud en los datos confirma el dinamismo del crecimiento en la especie y la potencialidad de utilizar el área de copa como predictor confiable del área basal.

Gráfico 1

Histograma del diámetro de copa

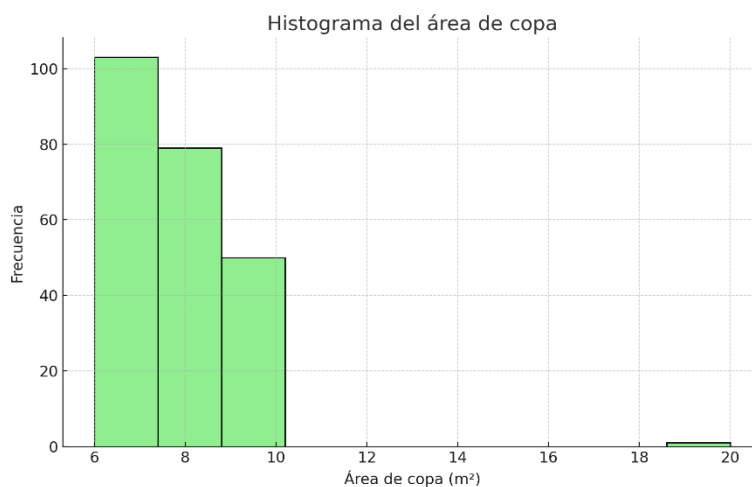


Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m – metros.

El histograma evidencia que el 55,1% de los individuos se concentra entre 2,5 y 3,5 m de diámetro de copa. La marcada asimetría hacia la izquierda confirma que más del 90% de los árboles no superan los 4 m, lo que es coherente con la corta edad de la plantación y con estudios previos que señalan el rápido establecimiento inicial de *G. arborea*.

Gráfico 2

Histograma del área de copa

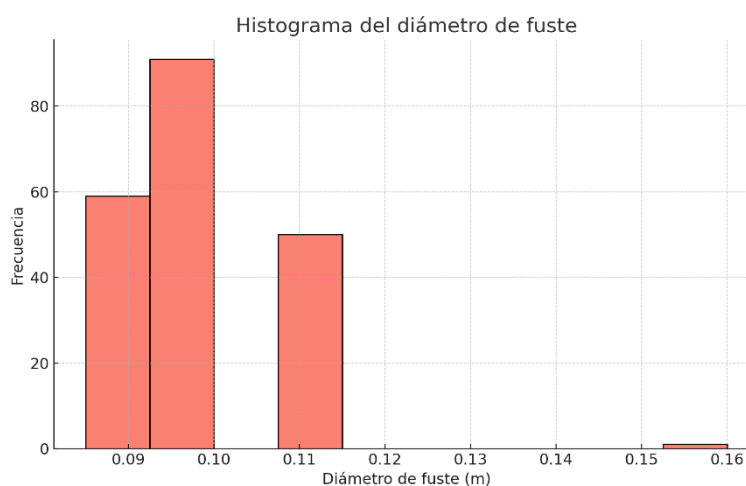


Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m² – metros cuadrados.

El área de copa se concentró principalmente entre 5 y 10 m² (56,3% de los individuos), mientras que menos del 1,5% superó los 17,5 m². Estos resultados reflejan la influencia de la densidad de plantación en la expansión lateral de las copas, limitada en esta etapa por la competencia temprana entre individuos.

Gráfico 3

Histograma del diámetro de fuste

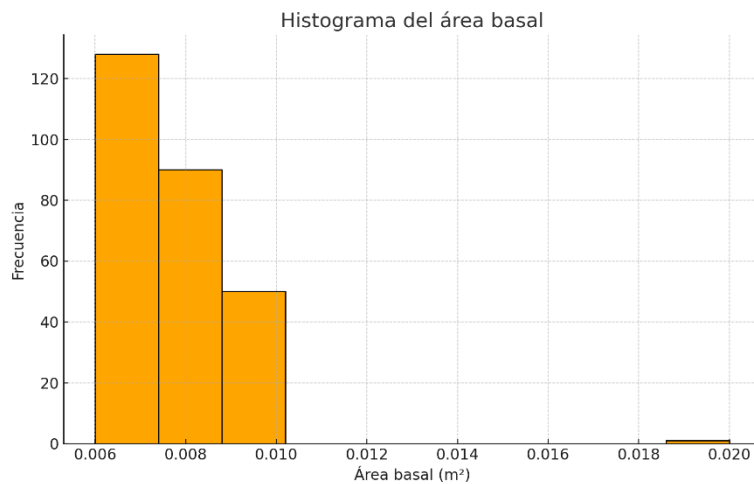


Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m – metros.

El diámetro de fuste mostró que casi el 47% de los individuos se ubica entre 0,08 y 0,10 m. Solo casos aislados superaron 0,15 m, lo que denota uniformidad estructural y refuerza la correspondencia entre copa y fuste en el crecimiento inicial de la especie.

Gráfico 4

Histograma del área basal



Nota: Leyenda: N – número de individuos estudiados; m² – metros cuadrados.

El área basal se concentró en el rango 0,0050–0,0100 m², con un 67,5% de los individuos. El reducido número de valores extremos confirma la homogeneidad relativa del rodal y valida la robustez de los datos para el desarrollo de modelos predictivos.

Correlación entre el área de copa y el área basal

Tabla 3

Correlación de Spearman entre el área de copa y el área basal

Relación	Coefficiente de correlación	Significancia
Área de copa vs Área basal	0,888**	0,000

Nota: Leyenda: La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral). Sig. – significancia; m² – metros cuadrados.

La correlación de Spearman arrojó un valor de 0,888 ($p < 0,01$), lo que indica una asociación positiva muy fuerte entre el área de copa y el área basal. Este hallazgo valida la hipótesis del estudio: a medida que se incrementa el área de copa, se incrementa proporcionalmente el área basal, confirmando la pertinencia del uso de métricas de copa como indicadores no destructivos del crecimiento.

Modelo predictivo del área basal

Tabla 4

Resumen del modelo de regresión lineal

R	R ²	R ² ajustado	Error estándar
0,885	0,784	0,783	0,001

Fuente: elaboración propia.

El modelo de regresión lineal explicó el 78,4% de la variabilidad del área basal a partir del área de copa. El alto valor de R^2 y el reducido error estándar demuestran que la relación es sólida y confiable. El análisis de residuos evidenció normalidad y ausencia de sesgos, lo cual respalda la validez estadística del modelo. En consecuencia, se confirma la factibilidad de utilizar variables de copa captadas mediante UAV como predictores robustos del área basal en plantaciones de *G. arborea*.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran una fuerte correlación entre el área de copa y el área basal en plantaciones de Gmelina arborea de 18 meses, lo que confirma la hipótesis de que métricas derivadas de imágenes aéreas pueden servir como predictores no destructivos del área basal. El modelo de regresión lineal ajustado explicó aproximadamente un 78,4% de la variabilidad en el área basal a partir del área de copa, lo cual indica un ajuste robusto y prometedor para aplicaciones en el monitoreo forestal.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones recientes que evidencian la eficacia de las métricas de copa como predictores de atributos dendrométricos. Xiong et al. (2023) demostraron que la información de copa obtenida mediante UAV-LiDAR puede estimar con alta precisión el crecimiento anual de plantaciones de coníferas, mientras que Lin et al. (2023) reportaron mejoras significativas en la estimación de biomasa aérea utilizando modelos alométricos basados en UAV-LiDAR. Del mismo modo, estudios en plantaciones de Platycladus orientalis evidencian que las condiciones de sitio y la densidad influyen de manera decisiva en el desarrollo del área de copa y basal, reforzando la pertinencia de estas variables en los modelos de crecimiento (Forests, 2022). Asimismo, Ball et al. (2023) mostraron que las técnicas de segmentación automática permiten delinear copas con gran precisión en bosques tropicales, confirmando la aplicabilidad de enfoques no destructivos similares al presente estudio.

Desde una perspectiva teórica, este estudio aporta evidencia empírica a la línea de investigación que busca sustituir mediciones destructivas o intensivas en tiempo por técnicas basadas en teledetección. El hecho de que métricas de copa expliquen más del 78% de la variabilidad del área basal contribuye al desarrollo de modelos dendrométricos más eficientes y adaptados a plantaciones jóvenes de rápido crecimiento. En el plano práctico, los hallazgos implican una reducción significativa de costos y tiempos en inventarios forestales, así como una menor perturbación en las plantaciones. Estos resultados son de especial interés para el manejo sostenible de Gmelina arborea, especie de alto valor comercial en sistemas productivos de la región tropical.

Si bien el modelo mostró un alto grado de ajuste, presenta limitaciones. La investigación se realizó en plantaciones jóvenes con individuos de la misma edad y bajo condiciones ambientales homogéneas, lo cual restringe la generalización a rodales de mayor edad o distintas densidades de plantación. Asimismo, la precisión de las estimaciones depende de la calidad de las imágenes aéreas, del nivel de resolución (GSD) y de la eficacia de los algoritmos de segmentación utilizados, lo que introduce márgenes de error que deben ser considerados al extrapolar los resultados.

Para fortalecer el modelo, se recomienda validar su aplicabilidad en rodales de diferentes edades, densidades y condiciones de sitio. La incorporación de variables adicionales como volumen de copa, índices de competencia y altura total de los árboles podría enriquecer la capacidad predictiva de las ecuaciones. Asimismo, la integración de algoritmos de aprendizaje profundo para la segmentación y clasificación de copas permitiría incrementar la precisión y automatización del proceso. Estas líneas de investigación futura facilitan el desarrollo de herramientas más generalizadas y robustas para la gestión forestal sostenible en especies tropicales de rápido crecimiento como Gmelina arborea.

CONCLUSIÓN

El área de copa estimada mediante fotogrametría aérea con UAV se confirma como un predictor sólido y de alta confiabilidad para la estimación del área basal en plantaciones jóvenes de *Gmelina arborea*. Los resultados revelan que esta variable explica hasta el 78,4% de la variabilidad observada, lo que evidencia un ajuste estadístico robusto y consistente con la literatura reciente en el ámbito de la teledetección forestal. Este hallazgo valida el potencial de las métricas de copa como sustitutos de mediciones tradicionales invasivas y refuerza la utilidad de métodos no destructivos en la evaluación estructural de rodales jóvenes.

El modelo propuesto tiene implicaciones prácticas significativas para el monitoreo forestal y la gestión de plantaciones de rápido crecimiento como *Gmelina arborea*. Al basarse en información obtenida mediante UAV y técnicas de fotogrametría, ofrece estimaciones rápidas, económicas y precisas, evitando la necesidad de mediciones destructivas en campo. Esta característica no solo reduce los costos operativos y el tiempo de inventario, sino que también minimiza el impacto sobre los ecosistemas, constituyendo una herramienta innovadora para la planificación forestal sostenible. En consecuencia, el modelo representa un aporte metodológico que facilita la toma de decisiones en el ámbito productivo y de conservación.

A pesar de los resultados obtenidos, se hace evidente la necesidad de validar el modelo en plantaciones con diferentes edades, densidades y condiciones de sitio, a fin de garantizar su aplicabilidad generalizada. La dependencia exclusiva de rodales jóvenes constituye una limitación que debe superarse mediante estudios longitudinales y comparativos. Asimismo, la incorporación de nuevas métricas derivadas de UAV, como volumen de copa o índices de competencia, así como la implementación de algoritmos de aprendizaje profundo para la segmentación de imágenes, permitirán perfeccionar la precisión de las estimaciones. De esta forma, el modelo podría evolucionar hacia una herramienta predictiva más robusta y universal.

El presente estudio aporta evidencia científica de gran relevancia para el manejo sostenible de *Gmelina arborea* en la región de Santo Domingo de los Tsáchilas (Ecuador), al establecer un referente metodológico aplicable a escenarios de investigación y gestión forestal. La combinación de técnicas no destructivas con herramientas de análisis estadístico avanzado permite generar información precisa y replicable que contribuye a optimizar la gestión de recursos forestales. Este trabajo no solo fortalece la base científica local, sino que también constituye un punto de partida para investigaciones futuras orientadas a consolidar modelos dendrométricos innovadores que integren tecnología, sostenibilidad y eficiencia operativa.

REFERENCIAS

Ahirwar, S; Swarnkar, R; Bhukya, S; Namwade, G. 2019. Application of Drone in Agriculture. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 8(01):2500-2505. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.264>.

Baena, S; Boyd, D; Moat, J. 2018. UAVs in pursuit of plant conservation - Real world experiences. Ecological Informatics (Serie The use of spatial ecology for conservation) 47:2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.11.001>.

Ball, J. G. C., Hickman, S. H. M., & Jackson, T. D. (2023). Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 9(5), 641-655. <https://doi.org/10.1002/rse2.332>

Banu, P; Borlea, G; Banu, C. 2016. The Use of Drones in Forestry (en línea). Journal of Environmental Science and Engineering B 5(11). DOI: <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007>.

Boeno, M., et al. (2021). Individual tree detection and qualitative inventory of a Eucalyptus stand using UAV photogrammetry data. Remote Sensing, 13, 3655.

Brūmelis, G., Dauškane, I., Elferts, D., Strode, L., Krama, T., & Krams, I. (2020). Estimates of tree canopy closure and basal area as proxies for tree crown volume at a stand scale. Forests, 11(11), 1180.

Buchelt, A; Adrowitzer, A; Kieseberg, P; Gollob, C; Nothdurft, A; Eresheim, S; Tschatschek, S; Stampfer, K; Holzinger, A. 2024. Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management. Forest Ecology and Management 551:1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121530>.

Frank, B., Mauro, F., & Temesgen, H. (2020). Model-based estimation of forest inventory attributes using LiDAR: A comparison of the area-based and semi-individual tree crown approaches. Remote Sensing, 12(16), 2525.

Gallardo, J; Pompa, M; Aguirre, C; López, P; Meléndez, A. 2020. Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal (en línea). 11. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.794>.

González, J; Diéguez, U; Álvarez, J; Rojo, A. 2005. LiFOR: Aplicación informática para el procesamiento de datos en inventarios forestales. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (19):123-128.

González, R; Rabino, A; Azzaro, F. 2020. Uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) como método de monitoreo de la sanidad forestal en plantaciones de coníferas en Patagonia Norte, Argentina. Quebracho - Revista de Ciencias Forestales 28(2):88-99.

Hemery, G; Savill, P; Pryor, S. 2005. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. Forest Ecology and Management 215(1):285-294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.016>.

Hernández, J; Aguirre, Ó; Alanís, E; Jiménez, J; Treviño, E; González, M; Luján, C; Olivas, J; Domínguez, A. 2018. Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México (en línea). Madera y Bosques 24(2). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421767>.

Hernández-Cole, J., Ortiz-Malavassi, E., Moya, R., & Murillo, O. (2021). Evaluation of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *Tectona grandis* in silvopastoral systems in Costa Rica. Drones, 5(2), 47.

Huspek, R., et al. (2023). A non-destructive approach to develop tree-level allometric equations for estimating aboveground biomass in forests of Tripura, Northeast India. *Tropical Ecology*.

Lin, J., Chen, D., Yang, S., Liao, X., & otros. (2023). Precise aboveground biomass estimation of plantation forest trees using the novel allometric model and UAV-borne LiDAR. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1166349. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1166349>

Malleux, R. 2007. Estudio comparativo entre dos sistemas de clasificación digital y la interpretación visual para la estratificación del bosque de producción permanente Biabo–Cordillera azul. Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 143 p.

Medina, C; López, P; Rocha, V; Torres, A; Uribe, M. 2021. Experiencia educativa de drones en silvicultura 4.0, competencias específicas del profesional forestal. *e-CUCBA* (17):79-87. DOI: <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi17.212>.

Peñalver, A; Aguilar, F; Nemmaoui, A; Rivas, J; Triana, Á; Aguilar, M; Llanderal, A. 2021. Precisión y eficiencia del inventario de plantaciones de teca en Ecuador mediante escáner láser terrestre. *Madera y Bosques* 27(1):1-14. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712097>.

Reyes, N; Rodríguez, G; Enríquez, J; Jiménez, C; Rincón, J. 2022. Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo* 13(1):22-31. DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3299>.

Scientific Electronic Archives. (2022). Estimating tree volume based on crown mapping by UAV pictures in Amazonian forest. *Scientific Electronic Archives*, 15(6).

Tang, L; Shao, G. 2015. Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research* 26(4):791-797. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>.

Tree Crown Affects Biomass Allocation and Its Response to Site Conditions and the Density of *Platycladus orientalis* Plantation. (2022). *Forests*, 14(12), 2433. <https://doi.org/10.3390/f14122433>

Wielgosz, M., Kontogianni, T., Peters, T., Puliti, S., Astrup, R., & Schindler, K. (2023). Automated forest inventory: analysis of high-density airborne LiDAR point clouds with 3D deep learning. *arXiv*.

Xiong, J., Zeng, H., Cai, G., Li, Y., Chen, J. M., & Miao, G. (2023). Crown Information Extraction and Annual Growth Estimation of a Chinese Fir Plantation Based on Unmanned Aerial Vehicle–Light Detection and Ranging. *Remote Sensing*, 15(15), 3869. <https://doi.org/10.3390/rs15153869>

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 