



Centro Agrícola

Centro de Investigaciones Agropecuarias
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Estimación del crecimiento y almacenamiento de biomasa en árboles multietáneos de *Calycophyllum candidissimum* en la región Frailesca, Chiapas, México

Estimation of biomass growth and storage in multi-aged *Calycophyllum candidissimum* trees in the Frailesca region, Chiapas, Mexico

Erick de Jesús Ralda-Molina , Adalberto Hernández-López , Deb Raj-Aryal ,
Irving Oswaldo Velázquez-Ríos , Francisco Guevara-Hernández* ,
Rene Pinto-Ruíz , Manuel Alejandro La O-Arias 

Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), carretera Ocozacoautla – Villaflores km 84,5, Villaflores 30470, Chiapas, México

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 26/03/2025
Aceptado: 18/08/2025

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no existir conflicto de intereses

CORRESPONDENCIA

Francisco Guevara-Hernández
francisco.guevara@unach.mx



CF: cag091252457

RESUMEN

Contexto: Las plantaciones forestales constituyen una alternativa sostenible para satisfacer la demanda de productos maderables y servicios ecosistémicos. **Objetivo:** Estimar el crecimiento del diámetro a la altura del pecho, el volumen comercial y la captura de carbono de *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC. mediante variables dasométricas y morfométricas en plantaciones de 7 a 10 años. **Métodos:** Se aplicaron regresiones logarítmicas utilizando la edad como variable independiente. Se estimó la biomasa y carbono mediante ecuaciones alométricas validadas. Se analizaron diferencias estadísticamente significativas en las variables entre edades ($p < 0,001$), y correlaciones ($p < 0,05$) mediante pruebas según la normalidad de los datos. **Resultados:** La esbeltez sugiere baja resistencia estructural frente a eventos climáticos y mayor rendimiento maderable. El análisis de componentes principales explicó el 82,90% de la variabilidad, diferenciando la morfología de copa y el crecimiento del fuste. Los modelos de regresión para estimar el crecimiento arbóreo presentaron coeficientes de determinación moderados ($R^2 < 0,62$), pero fueron estadísticamente significativos ($p < 0,001$) y cumplieron con los supuestos de análisis. La captura de carbono osciló entre 10,47 y 55,87 t ha⁻¹, con el 88% acumulado en la fracción aérea, equivalente a 38,42 y 205,02 t ha⁻¹ de CO₂, respectivamente. **Conclusiones:** Las variables morfométricas evidencian un

crecimiento vertical dominante en la copa. Se recomienda ampliar el rango de edades estudiadas para mayor comprensión del crecimiento arbóreo e incorporar estudios del sitio para optimizar la gestión silvicultura en la región. *C. candidissimum* puede considerarse como una especie viable para captura de carbono y mercados voluntarios.

Palabras clave: Carbono forestal, dasometría, Frailesca, servicios ecosistémicos, silvicultura tropical

ABSTRACT

Context: Forest plantations are a sustainable alternative for meeting the demand for timber products and ecosystem services. **Objective:** To estimate the growth in diameter at breast height, commercial volume, and carbon sequestration of *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC. using dasometric and morphometric variables in plantations aged 7 to 10 years. **Methods:** Logarithmic regressions were applied using age as an independent variable. Biomass and carbon were estimated using validated allometric equations. Statistically significant differences in variables between ages ($p < 0.001$), and correlations ($p < 0.05$) were analyzed using tests based on data normality. **Results:** Slenderness suggests low structural resistance to climatic events and higher timber yield. Principal component analysis explained 82.90% of the variability, differentiating crown morphology and stem growth. The regression models for estimating tree growth had moderate coefficients of determination ($R^2 < 0.62$), but were statistically significant ($p < 0.001$) and met the analysis assumptions. Carbon capture ranged from 10.47 to 55.87 t ha⁻¹, with 88% accumulated in the aerial fraction, equivalent to 38.42 and 205.02 t ha⁻¹ of CO₂, respectively. **Conclusions:** Morphometric variables show dominant vertical growth in the crown. It is recommended to expand the range of ages studied for a better understanding of tree growth and to incorporate site studies to optimize silvicultural management in the region. *C. candidissimum* can be considered a viable species for carbon sequestration and voluntary markets.

Keywords: Forest carbon, dasometry, Frailesca, ecosystem services, tropical silviculture

INTRODUCCIÓN

A pesar de la creciente disponibilidad de materiales alternativos, las proyecciones indican una demanda cada vez mayor de recursos forestales para el año 2050 (Johnston *et al.*, 2023). Este panorama resalta la relevancia sostenida de los ecosistemas forestales por su papel clave como materia prima renovable en la bioeconomía y la sostenibilidad ambiental. En el caso de Chiapas, México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) reportó para el 2018 una Producción Forestal Maderable (PFM) de 137 646 m³, con un valor económico estimado en 223 592 517,00 MXN. En este contexto, la silvicultura no solo constituye un conjunto de conocimientos científicos y técnicos orientados al mejoramiento de la calidad y propiedades de la madera, sino también es una herramienta esencial para la adaptación a las necesidades ecológicas actuales mediante el manejo sostenible de los recursos forestales.

La planificación de plantaciones forestales a nivel de rodal representa una estrategia efectiva ante de-

mandas multifactoriales, mientras que contribuye al derrame económico sin comprometer el equilibrio ecológico. En estas plantaciones, la estructura vertical y la composición del dosel difieren de los bosques tropicales naturales, debido a que la arquitectura de los árboles responde a la constitución genética de las especies cultivadas, así como a las condiciones y prácticas de manejo (Gao *et al.*, 2024).

Para orientar adecuadamente la gestión forestal, incluyendo las actividades silvícolas necesarias, el diseño de plantación, la regeneración del cultivo y la estimación del capital económico es necesario contar con estimaciones precisas del crecimiento y el volumen comercial (Vc), lo cual se logra mediante la formulación de ecuaciones específicas (Hernández *et al.*, 2020). Estas estimaciones requieren mediciones detalladas de la morfología arbórea, que permitan calcular el crecimiento y el volumen aprovechable, así como aportar información sobre la estabilidad y vitalidad de los individuos (Gonzalez-Benecke *et al.*, 2022).

Además, los ecosistemas forestales brindan múltiples servicios ecosistémicos, entre los que destaca el almacenamiento de carbono (C) mediante el proceso de fotosíntesis. Se estima que en estos ecosistemas contribuyen con una cuarta parte del total global de C absorbido desde la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO₂). Este gas de efecto invernadero ha adquirido gran relevancia en las últimas décadas debido al aumento sostenido de sus emisiones. La tendencia creciente muestra un incremento anual promedio superior a 2 ppm de CO₂ atmosférico entre 2005 y 2023, que ha resultado en una acumulación total de 100,21 ppm en los últimos 50 años (NOAA, 2024). Estas emisiones se atribuyen principalmente a actividades humanas, como la generación de energía a partir de combustibles fósiles, así como a otras acciones orientadas a satisfacer demandas productivas y de consumo. En este contexto, la captura de C contribuye significativamente a la regulación climática, a mitigar sus impactos (Castillo Figueroa, 2021), y genera oportunidades a mercados sostenibles. Gracias a técnicas, directrices y modelos de gestión validados, es factible estimar el C capturado en forma de biomasa, crucial para evaluar el papel de las masas forestales en la mitigación del cambio climático.

Por otro lado, las especies seleccionadas para producir no solo deben responder únicamente a las demandas del mercado, sino también favorecer la interacción biótica intraespecífica, promoviendo así un equilibrio ecológico dentro del área de siembra. Una especie destacada en este contexto es *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC., de la familia Rubiaceae, conocida regionalmente como “canelo” o “árbol de canelo”. Esta especie es típica del occidente de México y de selvas medianas en el estado de Chiapas, incluyendo la Reserva de la Biosfera Selva “El Ocoite”, aunque no se encuentra en las zonas más húmedas del Soconusco (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019). Su distribución natural se extiende hasta países sudamericanos como Venezuela y Colombia. Su corteza alcanza hasta los 15 mm de espesor, no persistente y de fácil desprendimiento, lo que lo hace vulnerable a incendios frecuentes pese a su relativa resistencia al fuego (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019). Los árboles pueden alcanzar alturas de 6 a 35 m, con diámetros a la altura del pecho (DAP) entre 25 y 100 cm. Su madera oscura y liviana es difícil de trabajar, pero presenta

amplia demanda en la fabricación de herramientas, instrumentos agrícolas, carpintería general y en la construcción liviana (SEMAHN, 2022). El objetivo de esta investigación fue estimar el crecimiento arbóreo en términos del DAP y Vc, así como el C capturado por *C. candidissimum*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio y levantamiento de datos

El área de análisis se centró en un rodal multietáneo permanente al interior del Centro Universitario de Transferencia de Tecnología (CUTT) “San Ramón”, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), ubicado en Villaflores, Chiapas, México, municipio de la región Frailesca. El polígono se ubicó en las coordenadas extremas UTM (WGS84) en la zona 15N (473103, 1796835) esquina noroeste y (473056, 1796748) esquina suroeste a 557 msnm (Figura 1). El clima predominante es cálido subhúmedo con temperaturas entre 14 y 26 °C. Las lluvias se concentran en verano, con precipitaciones de 1 000 a 3 500 mm. Los tipos de suelo preponderantes son leptosoles (36,36%) y regosoles (33,60%) (INEGI, 2017). El estudio se centró en *C. candidissimum*, y el rodal consistió en árboles sembrados en los años 2014, 2015, 2016 y 2017; se contabilizaron 79, 120, 139 y 72 plantas, respectivamente, sumando 414 individuos. El diseño de siembra consistió en un marco rectangular con distancias entre plantas e hileras de 2 y 6 m, respectivamente, en ausencia de sistemas de irrigación, planes de fertilización, podas y aclareos. La densidad de plantación fue de 833,33 plantas ha⁻¹.

La fase de campo se realizó en abril del 2024, se seleccionaron al azar 13 individuos con edades de 10, 9, 8 y 7 años, para un total de 52 unidades de análisis. Se cuantificaron variables dasométricas como: DAP (cm), considerando una altura estándar igual a 1,30 m; Vc (m³), la Altura total del árbol (Ht; m), la Altura del fuste (Hf; m), Longitud de copa (Hc; m) y Diámetro de copa (Dc; m), mediante técnicas estándar de dendrometría sugeridas por Coombes *et al.* (2019) y Karlinasari *et al.* (2021). También se tuvo en cuenta el incremento medio anual para la altura (IMA, m año⁻¹), según Arias (2005). Finalmente, se calcularon parámetros morfométricos como la Esbeltez (Es), Porcentaje de Copa (% C), Índice de

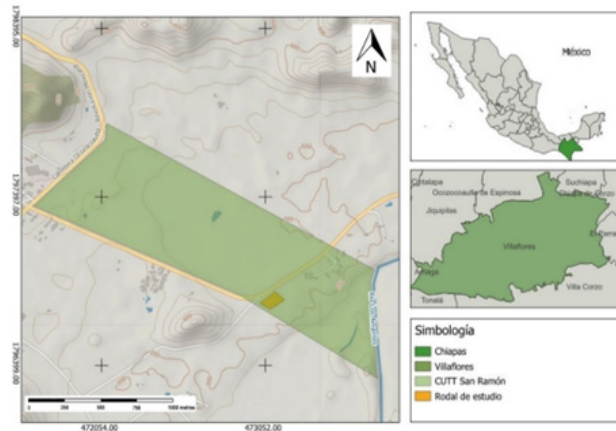


Figura 1. Ubicación del área de análisis, situado en el Centro Universitario de Transferencia de Tecnología (CUTT) “San Ramón” de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), en el municipio de Villaflora, Chiapas, México. El Datum es WGS 1984.

copa (Ic), Forma de copa (Fc), Índice de amplitud (Ia), e Índice Saliente (Is) (Karlinsari *et al.*, 2021).

Selección de variables y estimación del crecimiento arbóreo

Con el propósito de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y eliminar la multicolinealidad en variables dasométricas y parámetros morfométricos altamente correlacionadas, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP). A partir de los resultados se establecieron regresiones logarítmicas para modelar el crecimiento de *C. candidissimum*. Las ecuaciones de la regresión se ajustaron a los datos para predecir el DAP y el Vc, empleando la edad de los árboles (10, 9, 8 y 7 años), como variable independiente. Adicionalmente, se buscaron diferencias estadísticamente significativas en las variables estudiadas entre edades (ANOVA y Kruskal-Wallis; $p > 0,01$) y asociaciones mediante correlaciones (Pearson y Spearman; $p < 0,05$), empleando pruebas paramétricas y no paramétricas según el cumplimiento del supuesto de normalidad. Se obtuvieron coeficientes significativos para los modelos de regresión ($p < 0,001$), así como el cumplimiento de los supuestos de normalidad (Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,05$), independencia (Durvin-Watson ≈ 2 ; Rachas, $p > 0,05$) y homocedasticidad de los residuos. De igual forma, se emplearon técnicas de validación cruzada, para ello se dividió el conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento y prueba, evaluando el rendimiento del modelo en datos no utilizados

durante el ajuste. Esta técnica aseguró la robustez y capacidad predictiva del modelo propuesto (Hastie *et al.*, 2009). Todos los estadísticos de prueba se realizaron utilizando con el software IBM SPSS Statistics, versión 26.0 para Windows.

Estimación de la biomasa

La biomasa aérea del árbol (AGB) se estimó indirectamente con base al modelo pantropical propuesto por Chave *et al.* (2014). La ecuación alométrica (Ecuación 1) fue desarrollada a partir de datos tomados de 4 004 árboles de bosques tropicales, subtropicales y sabanas arboladas distribuidos por todo el mundo (incluyendo a México), con DAP entre 5 y 212 cm. Cabe mencionar que los DAP de este estudio se situaron dentro del rango empleado por Chave *et al.* (2014). Esta ecuación brinda certeza en las estimaciones en diferentes tipos de bosque y condiciones bioclimáticas, mientras que la inclusión de la altura contribuye a minimizar posibles sesgos.

Ecuación 1. $AGB = 0,0673 (\rho \text{ DAP}^2 H)^{0,976}$

Donde AGB es la biomasa aérea (kg); ρ es la densidad específica (g cm^{-3}); DAP es el diámetro a la altura del pecho (cm) a 1,30 m y H es la altura total del árbol (m). Para ρ se consideró lo descrito por Guo *et al.* (2022) ($0,73 \text{ g cm}^{-3}$). Por otro lado, para la estimación de la biomasa de la raíz se utilizó la ecuación alométrica desarrollada por Cairns *et al.* (1997) (Ecuación 2).

Ecuación 2. $RBD = \exp [- 1,3267 + 0,8877 (\ln AGB) + 0,1045 (\ln (\text{edad}))]$

Donde RBD es la biomasa subterránea (raíz) ($t\ ha^{-1}$) y considerando a la edad en años. A partir de correlaciones se identificó la variable que se relacionó mayormente al AGB, situando al DAP ($p < 0,001$; $R^2 = 0,89$) como variable independiente robusta para estimar el AGB ($kg\ árbol^{-1}$) a través de regresión lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadísticos descriptivos de las variables dasométricas y parámetros morfométricos evaluados se presentan en la tabla 1. El rango de la Ht en árboles de 10, 9, 8 y 7 años varió entre 12,30 y 3,18 m, con diferencias estadísticamente significativas entre edades (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$). También se encontraron diferencias significativas en Hf, Hc y Dc entre las edades (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$) (Tabla 1). Algunos autores mencionan que la relación entre el DAP y Dc es definida, y reportan coeficiente de determinación (R^2) entre 0,19 y 0,55 en seis especies forestales (Arias, 2005), diferente a los hallazgos de este estudio ($p > 0,05$; $R^2 = 0,003$), que sugiere que el crecimiento del fuste no acompaña al crecimiento de la copa. En relación con los parámetros morfométricos, los valores medios de Es son > 70 (Tabla 1), que corresponde a individuos con menor estabilidad ante condiciones climáticas críticas como viento y lluvias extremas, con madera de mayor espesor en relación con su densidad y forma cilíndrica, que les confiere un rendimiento maderable superior a los de forma cónica con Es bajos (León Sánchez *et al.*, 2019). Estos resultados son congruentes con lo reportado por Arias (2005) en especies como *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm., *Vochysia ferruginea* Mart., *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., y *Hieronyma alchorneoides* Allemão, por León Sánchez *et al.* (2019) en *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, con valores entre 70 y 90 en árboles de 6, 15 y 35 años bajo fertilización mineral fraccionada.

El %C medio superó el 50% en las edades estudiadas, siendo mayor en aquellos individuos con 8 y 9 años ($> 70\%$) (Tabla 1). La proporción de copa es un indicador de la vitalidad de los árboles del rodal, ya que es donde se llevan a cabo procesos fisiológicos relacionados directamente con el crecimiento del árbol. La ausencia de correlación estadísticamente significativa con el DAP ($R^2 = 0,12$, $p > 0,05$) y las correlaciones significativas, siendo positiva con la Hc

($R^2 = 0,93$, $p < 0,01$) y negativa con el Dc ($R^2 = -0,40$, $p < 0,01$), demuestra un crecimiento centrado en la estructura vertical de la copa y el árbol, principalmente para los de 8 y 9 años (Tabla 1). El desarrollo predominante en la copa y los bajos DAP benefician la baja resistencia del fuste ante fuerzas mecánicas, lo que concuerda con el grado de Es observado.

La Fc presenta el mismo comportamiento que el %C, con medias entre 1,69 y 0,54, donde los árboles de 8 y 9 años, principalmente, se asocian con copas de estructura esbelta, mientras que los de 10 y 7 años con una copa achatada, lo que demuestra mayor productividad forestal en el primer grupo. En cuanto a los valores medios del Ic, fue > 1 en árboles de 8 y 9 años, que indica mayor proporción de biomasa en copa, y se corrobora con los datos del %C (Tabla 1). Estudios mencionan que ambos parámetros se ven influenciados con las condiciones del sitio, como la fertilidad de los suelos, la densidad del rodal, el acceso a la luz y la dominancia, en conjunto contribuye a la identificación del grado de desarrollo y vitalidad de los individuos (Hess *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2024). Adicionalmente, el crecimiento de los árboles sin intervenciones influye directamente en los parámetros que evalúan la copa.

Por otro lado, el Is e Ia revelan patrones estructurales que permiten comprender la dinámica poblacional y el papel ecológico de las especies en bosques tropicales. En este estudio se observaron valores entre 104,72 y 22,42 en el Is (Tabla 1). La media en árboles de 7 años superó al resto de edades, lo que sugiere individuos ecológicamente dominantes o codominantes con proporciones mínimas de árboles no emergentes en el dosel. El rango observado supera lo reportado para especies caducifolias tropicales, que van de 16 a 38 (Román *et al.*, 2009), lo que demuestra la ventaja competitiva del *C. candidissimum* en el crecimiento vertical. Fallas Montero y Vílchez Alvarado (2018) mencionan que la competencia arbórea en esta especie disminuye medida que incrementa la biomasa, así como la sucesión.

De igual manera, el Ia demostró un comportamiento heterogéneo con valores entre 0,21 y 1,49 (Tabla 1). Ambos índices demuestran un rodal con madurez estructural avanzada en árboles con 10 y 7 años, y sugiere que los de 8 y 9 años son característicos de áreas perturbadas. Estos resultados dan pauta para considerar que *C. candidissimum* podría actuar

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables dasométricas y parámetros morfométricos cuantificados en *Calycophyllum candidissimum*.

Edad	DAP (cm)	Ht (m)	Hf (m)	Vc (m ³)	Hc (m)	Dc (m)	IMA (m año ⁻¹)	Es	%C	Ic	Fc	Ia	Is
10	7,93 (± 1,21) a	6,03 (± 0,92) a	2,72 (± 0,50) a	0,0170 (± 0,0049) a	3,31 (± 0,88) a	4,90 (± 0,90) a	0,59 (± 0,11) a	77,51 (± 15,36) a	54,36 (± 9,42) a	0,68 (± 0,18) a	1,57 (± 0,47) a	0,82 (± 0,15) a	63,48 (± 16,18) a
9	9,79 (± 1,16) b	9,39 (± 1,94) b	2,11 (± 0,11) b	0,0161 (± 0,0022) a	7,28 (± 1,91) b	3,43 (± 1,05) b	0,97 (± 0,24) b	96,45 (± 19,72) b	76,46 (± 6,01) b	2,33 (± 0,93) b	0,54 (± 0,33) b	0,40 (± 0,19) b	34,97 (± 9,59) b
8	6,35 (± 0,72) c	8,29 (± 2,12) c	1,97 (± 0,17) b	0,0098 (± 0,0016) b	6,32 (± 2,11) c	3,39 (± 0,80) b	1,04 (± 0,26) b	131,37 (± 33,49) c	74,50 (± 7,60) b	1,98 (± 0,83) c	0,64 (± 0,34) b	0,45 (± 0,19) b	58,81 (± 12,97) c
7	5,71 (± 1,02) d	4,53 (± 0,85) d	1,95 (± 0,18) b	0,0087 (± 0,0017) b	2,57 (± 0,75) a	3,94 (± 0,80) c	0,64 (± 0,11) a	82,07 (± 21,25) a	55,76 (± 7,07) a	0,67 (± 0,22) a	1,69 (± 0,74) a	0,90 (± 0,26) a	70,49 (± 15,98) a

Donde: E = edad; DAP = diámetro a la altura del pecho a 1.30 m; Hf = altura total; Hc = altura del fuste; Vc = volumen comercial; Hc = longitud de copa; Dc = diámetro de copa; IMA = incremento medio anual para la altura total; Es = esbeltez; % C = porcentaje de copa; Ic = índice de copa; Fc = forma de copa; Ia = índice de amplitud; Is = índice saliente; MA ± DE = media aritmética ± desviación estándar. Número de observaciones por edad o año de siembra = 13. Las distintas letras representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,01$).

como facilitador en procesos de regeneración natural, al crear microhábitat con condiciones propicias para el establecimiento de otras especies (Chazdon *et al.*, 2007).

Proyecciones del DAP y volumen comercial *C. candidissimum*

El ACP permitió reducir la dimensionalidad de conjunto de datos y seleccionar las variables relevantes para estimar el crecimiento del *C. candidissimum*. La matriz de correlaciones evidenció multicolinealidad significativa entre las variables ($p < 0,01$). Se identificaron dos componentes principales (CP), lo cuales explicaron conjuntamente el 82,90% de la varianza total. El primer CP, relacionado con la forma morfológica de la copa explicó el 55,63% de la varianza y mostró correlaciones entre variables como Ht, %C, Hc, Es, IMA e Ic, y correlaciones inversas con Ia, Fc, Is y Dc. El segundo CP, vinculado al crecimiento del fuste, explicó el 27,27% de la varianza y se correlacionó el Hf, el DAP y el Vc. Estos componentes sirvieron de base para el desarrollo de modelos de regresión orientados a estimar el crecimiento del fuste a partir de la edad. Además, se observaron diferencias estadísticamente significativas en variables estructurales como el DAP (ANOVA, $p < 0,01$) y Vc (Kruskal-Wallis, $p < 0,01$) entre edades, evidenciando una progresión en el crecimiento. Particularmente, los individuos de 9 años presentaron mayores valores promedio en variables clave, lo que evidencia un mejor desarrollo posiblemente asociado a condiciones edáficas y ambientales favorables del sitio durante el 2015.

El crecimiento del DAP mostró diferencias estadísticamente significativas entre edades ($p < 0,001$). Se observó una tendencia positiva en la acumulación de biomasa con la edad. Esta relación fue consistente con el incremento observado en el Vc (Tabla 1). En la Figura 2a se observa la relación entre el DAP y la edad. El modelo de regresión logarítmico para estimar el DAP fue significativo con la Ecuación 3 ($R^2 = 0,38$; $p < 0,001$; $n = 52$).

Ecuación 3. $DAP = -11,128 + 8,714 \ln(\text{Edad})$

Los residuos de la regresión cumplieron con el supuesto de normalidad (Kolmogórov-Smirnov, $p > 0,05$), con los supuestos de independencia (Durvin-Watson=1,38; Rachas, $p > 0,05$) y homocedasticidad. La ecuación desarrolla en este estudio estima

un DAP ~27,99 cm a los 89 años, valor congruente con el reportado por Fallas Montero y Vilchez Alvarado (2018), quienes calcularon un diámetro de ~35 cm para la misma edad con un IMA de 0,39 cm año⁻¹.

Esta edad coincide en el momento en que *C. candidissimum* alcanza la competencia intra e interespecífica. Según la ecuación, se proyecta un DAP de 14,98 cm y 18,51 cm a los 20 y 30 años, respectivamente. Por otro lado, el IMA estimado para el diámetro fue de 7,79 cm año⁻¹ a los 10 años, lo que implica diámetros proyectados de 15,86 cm y 23,79 cm para 20 y 30 años, respectivamente. Las diferencias entre ambas estimaciones se atribuyen a la naturaleza lineal del IMA, que considera un único valor de entrada, en contraste con la modelación ajustada de la ecuación propuesta.

Para la estimación del crecimiento del Vc, el modelo de regresión fue estadísticamente significativo con la ecuación 4 ($R^2 = 0,62$; $p < 0,001$; $n = 52$). En la figura 2c se observa la relación entre variables. Los residuos se distribuyeron de acuerdo con la distribución normal (Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,05$). Además, se cumplieron los supuestos de independencia (Durvin-Watson=1,81; Rachas, $p > 0,05$) y homocedasticidad (Figura 2d).

Ecuación 4. Volumen Comercial = $-0,219 + 0,132 \ln(\text{Edad})$

El modelo generado estima un Vc de 0,18 m³ y 0,23 m³ para árboles de 20 y 30 años, respectivamente (176,44 dm³ y 229,96 dm³, respectivamente). Análisis de correlación de Pearson evidenciaron asociaciones estadísticamente significativas entre el DAP y Vc en individuos de 8, 9 y 10 años ($R^2 = 0,98$; 0,59 y 0,79, respectivamente, $p < 0,05$), lo que confirma la utilidad del DAP como variable predictora en la estimación de Vc.

La elección de modelos logarítmicos se fundamenta en la naturaleza no lineal del crecimiento arbóreo, permitiendo representar adecuadamente las dinámicas observadas en campo. Sin embargo, su aplicabilidad puede estar limitada por el tamaño muestral y las variables consideradas (Di Cosmo y Gasparini, 2020). Aunque se ha señalado que el diámetro del tocón es un predictor relevante DAP, Ht y Vc en especies forestales (Di Cosmo y Gasparini, 2020), los resultados de esta investigación destacan la edad como variable independiente eficaz para modelar el

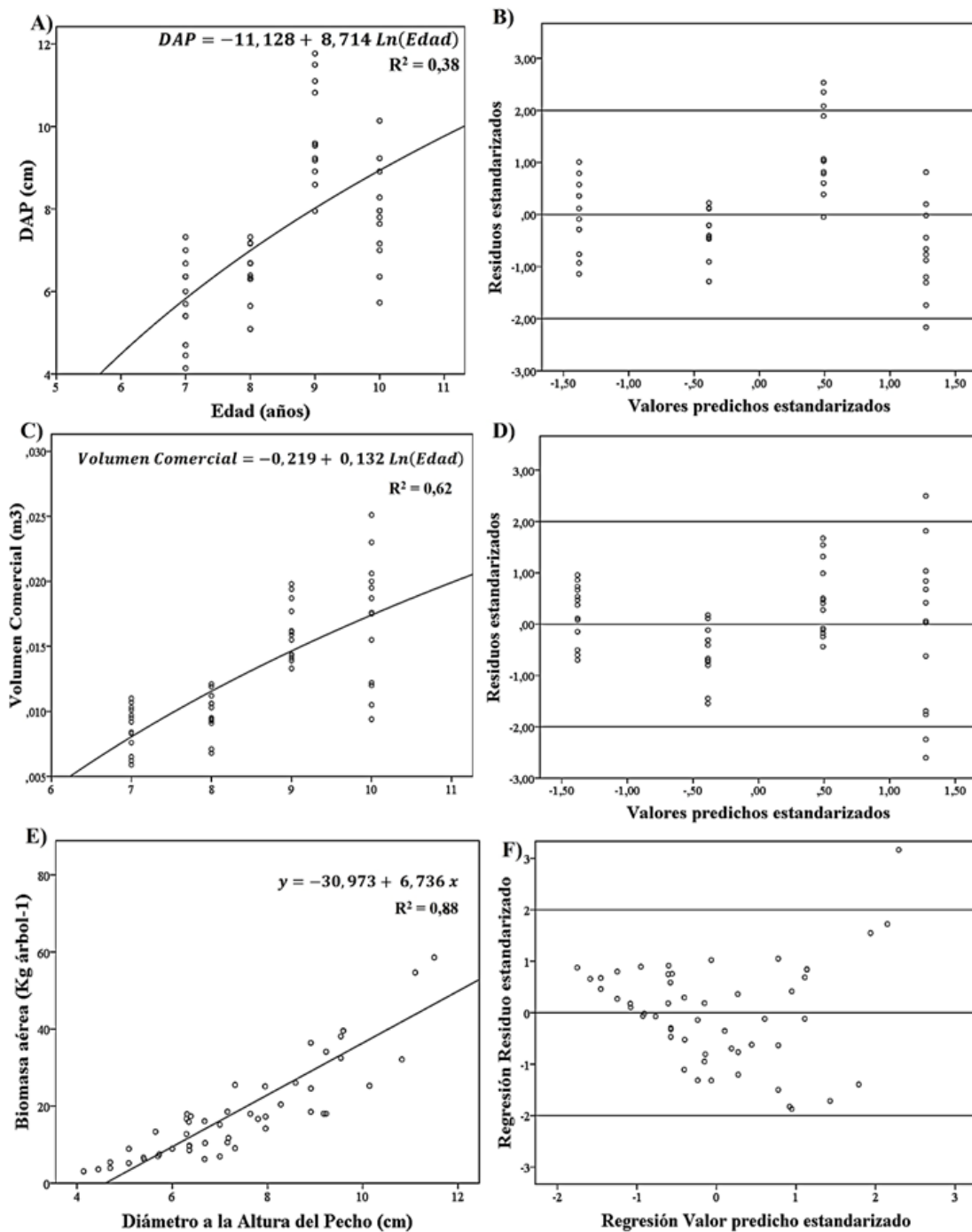


Figura 2. Modelos de regresiones para la estimación del crecimiento arbóreo y biomasa aérea en *Calycophyllum candidissimum*. a) Distribución del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP, cm) en relación con la edad (años) de los árboles; n=52; b) Relación entre los residuos estandarizados (RE) del modelo de regresión logarítmica para estimar el DAP y los valores predichos estandarizados (VPE); c) Distribución del Volumen comercial (Vc, m³) en relación con la edad (años); n=52; d) Relación entre los RE del modelo de regresión logarítmico para el Vc y los VPE; e) Distribución de la Biomasa Aérea capturada (kg árbol⁻¹) en relación con el DAP; f) Relación entre los RE del modelo de regresión lineal para estimar la Biomasa Aérea y los VPE.

crecimiento en rodales multietáneos. Se recomienda ampliar el rango de edades y considerar condiciones edafológicas para mejorar la robustez y aplicabilidad a escala regional.

Captura de carbono (C) en biomasa aérea y radicular

Los resultados de la estimación de la biomasa en la fase aérea, subterránea y total capturada por los árboles de *C. candidissimum* se observan en la tabla 2. La biomasa capturada mostró una tendencia general de incremento con la edad del arbolado, con una excepción en los individuos plantados en el 2015, cuya biomasa fue más de un 50% superior al promedio de otros años. Este patrón también se observó en las secciones aérea y subterránea. Se presume que este hallazgo se asocia a diferencias en las condiciones edáficas al momento de la plantación, particularmente en la fertilidad y disponibilidad de nutrientes, previamente señalados como factores determinantes en la producción de biomasa (Fallas Montero y Vilchez Alvarado, 2018; León Sánchez *et al.*, 2019; Martínez Bravo *et al.*, 2022). No obstante, se requieren análisis detallados para confirmar esta relación. La biomasa aérea capturada siguió el comportamiento 2015 > 2014 > 2016 > 2017; tendencia consistente para la biomasa en la fracción radicular. Para individuos en la clase diamétrica de 5 a 10 cm, la biomasa aérea promedio fue $17,02 \pm \sim 1,35$ kg árbol⁻¹, menor a los 22,77 kg árbol⁻¹ reportados por Fallas Montero y Vilchez Alvarado (2018), para la misma especie y clase diamétrica.

Se ajustó un modelo de regresión lineal para estimar el AGB (kg árbol⁻¹) en función del DAP (cm), obteniendo una ecuación con alto poder explicativo ($R^2=0,89$, $p<0,001$; $n=52$) (Ecuación 5; Figura 2e). Los residuos del modelo cumplieron con los supuestos de normalidad (Kolmogorov-Smirnov, $p>0,05$); independencia (Durvin-Watson=1,28; Rachas, $p=0,05$) y homocedasticidad (Figura 2f). Estos resultados respaldan la validez del modelo para predecir biomasa aérea a partir de variables dasométricas, en particular el DAP, en plantaciones de *C. candidissimum* en ecosistemas tropicales no intervenidos.

Ecuación 5. $y=-30,973+ 6,736 x$

En cuanto a la captura de C, en árboles de 10, 9, 8 y 7 años se observaron valores promedios de 25,38, 55,87, 22,72 y 10,47 t ha⁻¹, respectivamente, con el ~88% en la fracción aérea. Esto difiere con el ~60% y ~30% en la fracción aérea y subterránea, respectivamente, reportado en estudios previos (Castillo Figueroa, 2021). Rodríguez Larramendi *et al.* (2016) reportaron valores superiores en especies forestales de 20 a 100 años en la región Frailesca. Destaca una captura de 390 t ha⁻¹ en *Quercus rugosa* Neé, (encino); entre 50 y 82 t ha⁻¹ para el *Quercus robur* L. (roble) y entre 132 y 212 t ha⁻¹ en *Pinus oocarpa* Schiede (ocote). La variación de la captura de C observada responde a razones multifactoriales, entre ellos la condición edáfica, la especie y la edad de los árboles. En términos de CO₂ se estima una captura promedio de 93,15, 205,05, 83,37, y 38,42 t ha⁻¹ para árboles de 10, 9, 8 y 7 años, respectivamente. Esta informa-

Tabla 2. Estimación de la biomasa aérea y subterránea capturada por *Calycophyllum candidissimum*.

Edad (Años)	AGB (t ha ⁻¹)	RBD (t ha ⁻¹)	BT (t ha ⁻¹)	%RBD (%)
10	41,54 (± 4,16)	9,22 (± 0,83)	50,77	22,21
9	93,07 (± 5,38)	18,67 (± 0,96)	111,74	20,06
8	37,25 (± 2,75)	8,18 (± 0,54)	45,43	21,96
7	16,93 (± 0,69)	4,01 (± 0,15)	20,94	23,67

Donde: AGB = biomasa aérea (Media Aritmética ± Desviación Estándar; t ha⁻¹); RBD = biomasa en raíces (media aritmética ± desviación estándar; t ha⁻¹); BTC = biomasa total (t ha⁻¹); % RBD = porcentaje de biomasa en raíces (%).

ción es relevante para la generación de créditos de C en el mercado voluntario, donde en el 2023 el precio promedio fue de 137 MXN t⁻¹ (USD \$7,37) (SADER, 2024). Con base en esos valores y sin considerar costos de intermediarios ni impuestos, la valorización económica por hectárea varió entre 5 206 y 28 085 pesos mexicanos (USD \$279,18 - \$1 506,10), según la edad del arbolado.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman el potencial del *C. candidissimum* como una especie forestal viable para la producción maderable y la captura de C en sistemas tropicales. Las diferencias significativas entre edades en variables dasométricas y morfométricas evidencian un crecimiento dinámico, aunque con patrones estructurales que podrían comprometer la estabilidad mecánica del arbolado, especialmente ante eventos climáticos extremos, dada su esbeltez y arquitectura vertical de copa. Si bien los modelos de regresión logarítmica mostraron una capacidad predictiva moderada, su significancia estadística y el cumplimiento de los supuestos de análisis respaldan su utilidad para el manejo de plantaciones. El ACP permitió discriminar los factores que explican el crecimiento del fuste y la morfología de la copa, aportando una base analítica sólida para futuros esquemas de monitoreo y modelado de crecimiento. La estimación de CO₂ capturado resalta la viabilidad de esta especie para integrarse en mercados voluntarios de crédito de carbono. No obstante, se vuelve imperativo el desarrollo de estudios complementarios que integren variables bióticas y abióticas del sitio, con el fin de comprender su influencia sobre la vitalidad, estructura y productividad del rodal. Se recomienda avanzar hacia esquemas de manejo adaptativo que integren criterios ecológicos, silviculturales y económicos, a fin de optimizar el rendimiento productivo sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Análisis formal: Erick De Jesús Ralda-Molina, Francisco Guevara-Hernández, Deb Raj-Aryal y Adalberto Hernández-López

Conceptualización: Erick De Jesús Ralda-Molina, Deb Raj-Aryal y Adalberto Hernández-López

Conservación de datos: Erick De Jesús Ralda-Molina

Redacción - primera redacción: Erick De Jesús Ralda-Molina

Redacción - revisión y edición: Erick De Jesús Ralda-Molina, Deb Raj-Aryal y Francisco Guevara-Hernández

Investigación: Erick De Jesús Ralda-Molina y Francisco Guevara-Hernández

Metodología: Erick De Jesús Ralda-Molina, Deb Raj-Aryal, Manuel Alejandro La O-Arias y Irving Oswaldo Velázquez-Ríos

Software: Erick De Jesús Ralda-Molina e Irving Oswaldo Velázquez-Ríos

Validación: Francisco Guevara-Hernández, Rene Pinto-Ruiz y Manuel Alejandro La O-Arias

BIBLIOGRAFÍA

- ARIAS, D. A. 2005. Morfometría del árbol en plantaciones forestales tropicales. *Revista Forestal Mesoamericana Kurúa*, 2 (5): 19-32.
- CAIRNS, M. A., BROWN, S., HELMER, E. H. and BAUMGARDNER, G. A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111 (1): 1-11.
- CASTILLO FIGUEROA, D. 2021. Carbon cycle in tropical upland ecosystems: a global review. *Web Ecology*, 21 (2): 109-136.
- CHAVE, J., RÉJOU MÉCHAIN, M., BÚRQUEZ, A., CHIDUMAYO, E., COLGAN, M. S., DELITTI, W. B., DUQUE, A., EID, T., FEARNSIDE, P. M., GOODMAN, R. C., HENRY, M., MARTÍNEZ YRÍZAR, A., MUGASHA, W. A., MULLER LANDAU, H. C., MENCUCCINI, M., NELSON, B. W., NGOMANDA, A., NOGUEIRA, E. M., ORTIZ MALAVASSI, E., PÉLISIER, R., PLOTON, P., RYAN, C. M., SALDARRIAGA, J. G. and VIEILLEDENT, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 (10): 3177-3190.
- CHAZDON, R. L., LETCHER, S. G., VAN BREUGEL, M., MARTÍNEZ-RAMOS, M., BONGERS, F. and FINEGAN, B. 2007. Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362 (1478): 273-289.
- COOMBES, A. MARTIN, J. and SLATER, D. 2019. Defining the allometry of stem and crown dia-

- meter of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44: 1-8.
- DI COSMO, L. and GASPARINI, P. 2020. Predicting diameter at breast height from stump measurements of removed trees to estimate cuttings, illegal loggings and natural disturbances. *South-East European Forestry: SEEFOR*, 11 (1): 41-49.
- FALLAS MONTERO, E. y VÍLCHEZ ALVARADO, B. 2018. Competencia en el desarrollo de *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC. y *Guazuma ulmifolia* Lam. en bosques secundarios caducifolios del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (37): 34-47.
- GAO, Y., ZHANG, Z., LU, D., ZHOU, Y. and LIU, Q. 2024. Under-canopy afforestation after 10 years: assessing the potential of converting monoculture plantations into mixed stands. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1340058.
- GONZALEZ BENECKE, C. A., FERNÁNDEZ, M. P., GAYOSO, J., PINCHEIRA, M. and WIGHTMAN, M. G. 2022. Using tree height, crown area and stand-level parameters to estimate tree diameter, volume, and biomass of *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Forests*, 13 (12): 1-14.
- GUO, Y., LIN, Y., CHEN, W. Y., LING, J., LI, Q., MICHALSKI, J. and ZHANG, H. 2022. New two-step species-level AGB estimation model applied to urban parks. *Ecological Indicators*, 145: 1-13.
- HERNÁNDEZ, F. J., MERAZ ARAGÓN, J. C., VARGAS LARRETA, B. y NÁJERA LUNA, J. A. 2020. Crecimiento en diámetro, altura, área basal y volumen para tres especies de pino en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11 (60): 120-143.
- HESS, A. F., LOIOLA, T., ARRUDA DE SOUZA, I. y NASCIMENTO, B. 2016. Morfometría de la copa de *Araucaria angustifolia* en sitios naturales en el sur de Brasil. *Bosque (Valdivia)*, 37 (3): 603-611.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017. INEGI, México, 736 p.
- JOHNSTON, C. M. T., GUO, J. and PRESTEMON, J. P. 2023. RPA forest products market data for U.S. RPA Regions and the world, historical (1990-2015), and projected (2020-2070) using the Forest Resource Outlook Model (FORUM). Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/rds/archive/catalog/RDS-2022-0073-2>. Consultado 05/01/2025.
- KARLINASARI, L., ADZKIA, U., PUSPITASARI, T., NANDIKA, D., NUGROHO, N., SYAFITRI, U. D. and SIREGAR, I. Z. 2021. Tree morphometric relationships and dynamic elasticity properties in tropical rain tree (*Samanea saman* Jacq. Merr). *Forests*, 12 (12): 1-11.
- LEÓN SÁNCHEZ, M. A., REYES POZO, J. L., PÉREZ LEÓN, V. E., BONILLA VICHOT, M. y HERRERO ECHAVARRÍA, G. 2019. Esbeltez y fertilización mineral en plantaciones de *Pinus caribaea* en Cuba. *Madera y Bosques*, 25 (2): 1-11.
- MARTÍNEZ BRAVO, R. D., RICKER, M., NAVA CRUZ, Y. and SIEBE, C. 2022. Mineral fertilization in tropical reforestation: seedling growth and survival of ten native tree species in Tabasco, Mexico. *Madera y Bosques*, 28 (1): 1-17.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2025. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Science & Information for a Climate-Smart Nation. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=Carbon%20dioxide%20concentrations%20are%20rising,in%20just%20a%20few%20hundred>. Consultado 07/02/2025.
- RODRÍGUEZ LARRAMENDI, L. A., GUEVARA HERNÁNDEZ, F., REYES MURO, L., OVANDO CRUZ, J., NAHED TORAL, J., PRADO LÓPE, M. y CAMPOS SALDAÑA, R. A. 2016. Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (37): 77-94.
- RODRÍGUEZ TREJO, D. A., MARTÍNEZ MUÑOZ, P. y LARA, P. J. M. 2019. Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciência Florestal*, 29 (3): 1033-1047.
- ROMÁN, M., BRESSAN, D. A. and DURLO, M. A. 2009. Variáveis morfológicas e relações in-

terdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. *Ciência Florestal*, 19 (4): 473-480.

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (SADER). 2024. El sector agropecuario en el Mercado Voluntario de Carbono en México: Reporte técnico. SADER, México, 55 p.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE E HISTORIA NATURAL (SEMAHN). 2022. Guía Ilustrada de Especies Forestales para el Estado de Chiapas. SEMAHN, Chiapas, México, 91 p.

TIAN, D., HE, P., JIANG, L. and GAIRE, D. 2024. Developing crown width model for mixed forests using soil, climate and stand factors. *Journal of Ecology*, 112 (2): 427-442.

CITAR COMO:

RALDA-MOLINA, E. J., HERNÁNDEZ-LÓPEZ, A., RAJ-ARYAL, D., VELÁZQUEZ-RÍOS, I. O., GUEVARA-HERNÁNDEZ, F., PINTO-RUÍZ, R., LA O-ARIAS, M. A. 2025. Estimación del crecimiento y almacenamiento de biomasa en árboles multietáneos de *Calycophyllum candidissimum* en la región Frailesca, Chiapas, México. *Centro Agrícola*, 52 (2025) e2457



Artículo de **libre Acceso** bajo los términos de una *Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional*. Se permite, sin restricciones el uso, distribución, traducción y reproducción del documento, siempre que la obra sea debidamente citada.