

Reservas biológicas privadas como sumideros de carbono: estimación de biomasa aérea en la Reserva Biológica Tirimbina, Costa Rica

**Private biological reserves as carbon sinks: aboveground biomass estimation in the
Tirimbina Biological Reserve, Costa Rica**

Levy Nectaly Mejia¹  • Branko Hilje¹ 

Recibido: 18/9/2025

Aceptado: 8/12/2025

Abstract

This study assessed aboveground biomass and carbon storage potential in six permanent plots of mature tropical rainforest located in the Tirimbina Biological Reserve, Sarapiquí, Costa Rica. Three allometric equations were applied, and floristic composition was analyzed using the Importance Value Index (IVI). Results show that the estimated biomass falls within the range reported for mature neotropical forests. Equations incorporating diameter, total height, and wood basic density provided more robust estimates in structurally complex ecosystems. The IVI analysis revealed that a few species, particularly *Pentaclethra macroloba*, concentrate a significant portion of the ecological and structural importance of the forest. This suggests that IVI may complement biomass assessments by identifying species contributing most to carbon storage. However, the integration of dominant species into management or restoration strategies should be aligned with conservation and ecosystem functionality goals, as some species, despite their dominance, may not hold commercial or priority management value. These findings underscore the relevance of biological reserves as long-term ecological research sites, providing key information for climate change mitigation and adaptation policies in the neotropics.

Keywords: Allometric equations, Importance Value Index (IVI), floristic composition, tree height and diameter, tropical forest dynamics.

1. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago Costa Rica; levymejia25@gmail.com, bhilje@gmail.com

Resumen

El estudio evaluó la biomasa aérea y el potencial de almacenamiento de carbono en seis parcelas permanentes de bosque tropical lluvioso maduro ubicadas en la Reserva Biológica Tirimbina, Sarapiquí, Costa Rica. Se aplicaron tres ecuaciones alométricas y se analizó la composición florística mediante el Índice de Valor de Importancia (IVI). Los resultados evidencian que la biomasa estimada se encuentra dentro de los rangos reportados para bosques maduros neotropicales, destacando que las ecuaciones que incorporan simultáneamente el diámetro, la altura total y la densidad básica de la madera proporcionan estimaciones más robustas en ecosistemas estructuralmente complejos. El análisis de IVI indicó que unas pocas especies, particularmente *Pentaclethra macroloba*, concentran gran parte de la importancia ecológica y estructural del bosque. Este patrón sugiere que el IVI puede complementarse en evaluaciones de biomasa para identificar especies con mayor contribución al almacenamiento de carbono. Sin embargo, la incorporación de estas especies en estrategias de manejo o restauración debe alinearse con objetivos de conservación y funcionalidad ecosistémica, dado que algunas, aunque dominantes, no poseen valor comercial o prioritario de manejo. Los resultados resaltan la utilidad de las reservas biológicas como sitios de largo plazo para investigación ecosistémica, proporcionando información clave para políticas de mitigación y adaptación al cambio climático en el neotrópico.

Palabras clave: Altura y diámetro de árboles, composición florística, dinámica de bosques tropicales, ecuaciones alométricas, Índice de Valor de Importancia (IVI).

Introducción

Los bosques tropicales albergan la mayor parte de la biodiversidad terrestre y desempeñan un papel crítico en la estabilidad climática global, al funcionar simultáneamente como reservorios de especies, reguladores hidrológicos y sumideros de carbono atmosférico [1, 2]. En este sentido, las reservas biológicas y estaciones de investigación cumplen una función estratégica para la conservación de estos ecosistemas, al proteger fragmentos de bosque maduro y proveer las condiciones necesarias para la innovación científica, la educación ambiental y el ecoturismo responsable [3]. Estas áreas actúan como laboratorios naturales donde se generan datos esenciales sobre la dinámica ecológica, la biodiversidad y los procesos clave que sostienen la resiliencia de los bosques tropicales.

En países altamente diversos como Costa Rica, el establecimiento de una red de reservas privadas y estaciones biológicas ha sido un componente central de las estrategias nacionales de conservación. Por ejemplo, las Áreas de Conservación del país cubren más del 25 % del territorio, con aproximadamente un 3 % adicional bajo figura de reservas privadas [4, 5]. Estudios señalan que las áreas protegidas privadas (PPAs, por sus siglas en inglés) contribuyen de modo creciente a la conectividad ecológica, la representatividad de ecosistemas y al cumplimiento de objetivos globales de biodiversidad [6]. Además, estas reservas privadas tienen una alta relevancia en monitoreo de fauna de fauna silvestre, y por su papel en la educación ambiental, la investigación científica y el ecoturismo [7-9].

A pesar de estos logros en biodiversidad, educación y ecoturismo, el potencial de las estaciones y reservas biológicas para contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono ha sido menos explorado en el contexto de Costa Rica. Mientras los bosques tropicales son reconocidos como sumideros importantes de carbono, el enfoque tradicional de los estudios se ha centrado en grandes áreas protegidas estatales o en bosques primarios extensos, mientras que las reservas privadas, las cuales representan una fracción significativa del paisaje forestal, siguen siendo subrepresentadas en cuanto a su cuantificación de biomasa aérea y carbono almacenado [7, 9]. Esto representa una brecha importante tanto para la ciencia ecológica como para las políticas de conservación y financiamiento climático.

La biomasa aérea de los bosques constituye un indicador integrador del funcionamiento ecosistémico, y refleja la productividad primaria, la estructura del bosque y su capacidad de resiliencia frente a perturbaciones tanto naturales como antrópicas [10]. Al estimar de forma confiable la biomasa aérea viva, es posible inferir el carbono acumulado en los árboles mediante ecuaciones alométricas validadas, lo que permite proyectar la dinámica del carbono en el tiempo y vincular la investigación ecológica con políticas de manejo sostenible y conservación [11]. Estudios en América tropical han evidenciado que los bosques maduros almacenan cantidades sustanciales de carbono por hectárea, tanto en biomasa aérea como en otros compartimentos del ecosistema [12]. Asimismo, en Costa Rica se han definido ecuaciones alométricas para bosques húmedos y otros tipos de bosque, lo que habilita su uso para estimaciones locales robustas [13, 14].

En este estudio se estimó la biomasa aérea viva y el carbono almacenado en un bosque tropical lluvioso maduro de la Reserva Biológica Tirimbina, ubicada en la región de Sarapiquí, provincia de Heredia, Costa Rica. Además de su aporte científico, la investigación destaca

el papel multifuncional de las reservas biológicas como espacios esenciales para la conservación, la educación ambiental, el ecoturismo científico y el monitoreo del carbono forestal. Este tipo de información refuerza el valor ecológico y social de las estaciones biológicas, y las consolida como componentes estratégicos en la conservación de los bosques tropicales y en las políticas de mitigación del cambio climático a nivel nacional e internacional.

Materiales y métodos

Área de estudio

Esta investigación se realizó en la Reserva Biológica Tirimbina (RBT), ubicada en el cantón de Sarapiquí, provincia de Heredia, Costa Rica (Figura 1). La precipitación promedio anual es de 3 833 mm, y la temperatura promedio anual de 25,3 °C. La reserva se encuentra a una altitud aproximada de 180 m.s.n.m. y corresponde a la zona de bosque tropical lluvioso según la clasificación de Holdridge [15]. Aproximadamente el 85 % de su superficie está cubierta por bosque maduro [16]. La RBT cuenta con seis parcelas permanentes de medición

(PPM) establecidas en el 2019, con el objetivo de evaluar la diversidad de distintos grupos vegetales y de fauna, así como las características del suelo, la composición florística, el crecimiento arbóreo y la regeneración natural de plantas. Las parcelas, de 50 × 20 m cada una, se distribuyeron a lo largo de los senderos principales de la reserva para facilitar el acceso, la logística y la toma de datos, manteniendo una distancia mínima de 250 m entre ellas.

Estimación de biomasa aérea y composición florística

En cada una de las PPM se registraron e identificaron a nivel de especie, todos los individuos arbóreos con un diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 10 cm, con el propósito de caracterizar la composición florística de cada sitio. El DAP se midió a 1,3 m sobre el nivel del suelo, siguiendo el protocolo estándar propuesto por Condit [16] para parcelas permanentes en bosques tropicales. En árboles con raíces tabulares, deformaciones o bifurcaciones por debajo de esa altura, el DAP se tomó inmediatamente por encima de la irregularidad. Las mediciones se realizaron utilizando una cinta diamétrica ($\pm 0,1$ cm de precisión). La altura total de cada árbol se

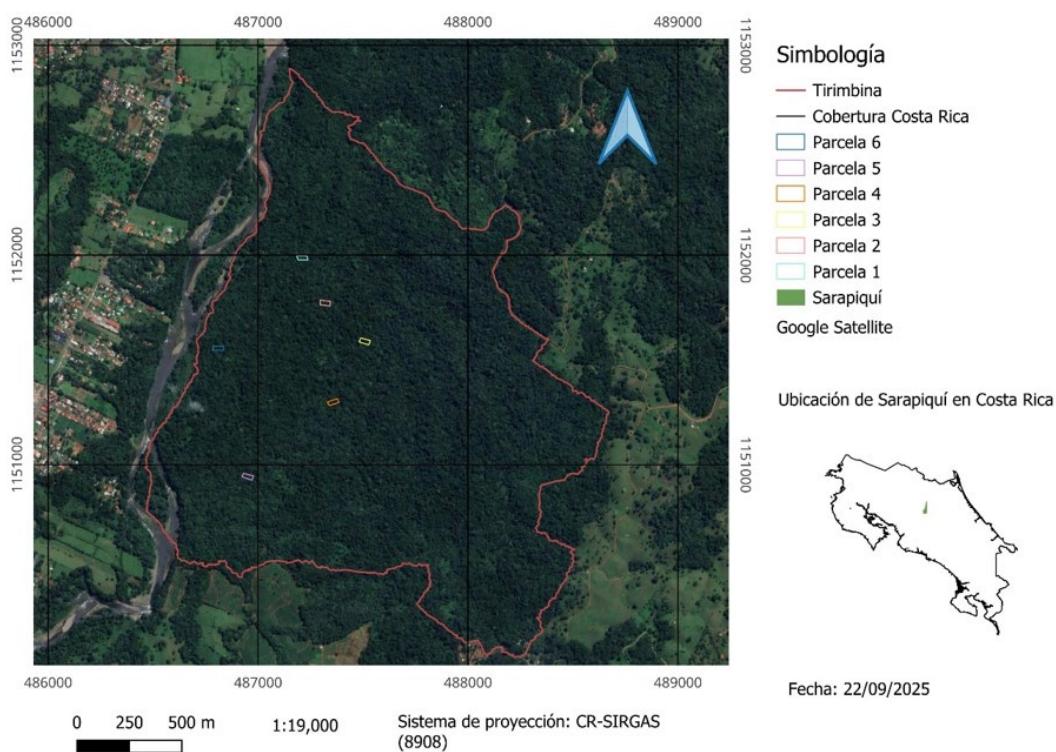


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de los sitios de muestreo en la Reserva Biológica Tirimbina, Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Mapa elaborado por Alicia Coto-Valverde.

Figure 1. Location of the study area and sampling sites in the Tirimbina Biological Reserve, Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Map prepared by Alicia Coto-Valverde.

estimó con un altímetro Haga, tomando la lectura desde el nivel del suelo y desde un punto con buena visibilidad de la copa. Los individuos fueron marcados con placas de aluminio numeradas para asegurar su seguimiento dentro de las PPM. La identificación taxonómica se realizó en campo por botánicos expertos en bosques tropicales lluviosos de Costa Rica. No se recolectaron ejemplares de herbario, ya que las especies se determinaron con base en características morfológicas diagnósticas observadas directamente en el sitio. Esta información fue fundamental para la estimación de la biomasa aérea, y permitió identificar las especies que aportan en mayor proporción a la biomasa total de las parcelas.

Se calculó además el Índice de Valor de Importancia (IVI) a partir de los datos obtenidos en las PPM. Para cada especie registrada se determinaron los tres componentes básicos: abundancia relativa, frecuencia relativa y dominancia relativa [17]. El IVI de cada especie se obtuvo mediante la suma de estos tres valores relativos, lo que permitió integrar en un solo índice su importancia ecológica dentro de las seis parcelas permanentes de muestreo. Este índice se utilizó para identificar las especies que contribuyen en mayor medida a la biomasa total del bosque y, por ende, aquellas con mayor capacidad de almacenamiento de carbono atmosférico.

Análisis de datos

Las variables estructurales obtenidas en campo (diámetro a la altura del pecho, altura total y densidad de la madera) se utilizaron para estimar la biomasa aérea viva (BA) a nivel de parcela, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas previamente desarrolladas para bosques tropicales húmedos.

Se emplearon tres ecuaciones alométricas con diferente nivel de complejidad y variables incluidas:

Ecuación 1, basada únicamente en el diámetro a la altura del pecho (DAP), propuesta por Brown [18] para bosques tropicales.

$$M = e^{-1,9967+2,3924 \ln(D)} \quad (R^2 = 0,89) \quad (1)$$

Ecuación 2, incorpora el DAP y la altura total del árbol, ajustada por Overman et al. [19] para ecosistemas tropicales húmedos:

$$M = e^{-2,9946+0,9317 \ln(D2H)} \quad (R^2 = 0,89) \quad (2)$$

Ecuación 3, incluye el DAP, la altura total (H) y la densidad básica de la madera (ρ), desarrollada por Chave et al. [20] para bosques tropicales húmedos de América Latina.

$$M = e^{-2,4360+0,1399 \ln(D)^2+0,7373 \ln(\rho HD^2)} \quad (R^2 = 0,95) \quad (3)$$

Para esta última ecuación, se empleó la densidad básica de la madera correspondiente a cada especie identificada [21, 22]. La biomasa aérea total por parcela se obtuvo mediante la suma de la biomasa estimada para todos los individuos registrados y, posteriormente, se extrapoló a una escala por hectárea con fines comparativos entre parcelas. Finalmente, los valores de biomasa fueron convertidos a carbono almacenado utilizando el factor estándar de 0,47, conforme a las directrices del IPCC [23].

Resultados y discusión

Estimación de biomasa aérea y composición florística

Los resultados obtenidos en las PPM de la Reserva Biológica Tirimbina muestran una composición florística dominada principalmente por la familia Fabaceae, seguida por Rubiaceae y Moraceae (Cuadro 1), con un total de 52 especies y 186 individuos registrados. Este patrón de distribución, caracterizado por una alta representación de unas pocas familias y la presencia escasa de la mayoría, coincide con lo reportado para bosques tropicales maduros en distintas regiones del Neotrópico, por ejemplo, en la Amazonía y en bosques húmedos de Colombia [24, 25].

En Costa Rica, estudios realizados en bosques del Valle Central confirman igualmente la dominancia de Fabaceae y Moraceae [26], sugiriendo que esta composición responde a características funcionales compartidas, tales como la capacidad de fijación de nitrógeno en miembros de Fabaceae, o la alta producción de frutos carnosos en Moraceae, que constituye un recurso clave para la fauna del bosque. Esta coincidencia entre distintas regiones tropicales refuerza la relevancia ecológica de estas familias como componentes estructurales y funcionales de los bosques, y su papel potencial en procesos relacionados con la acumulación de biomasa y resiliencia ecosistémica.

Además, la composición florística, especialmente la presencia de especies con altos valores de madera densa o de crecimiento lento influye directamente en la acumulación de biomasa aérea y, por ende, en el almacenamiento de carbono a largo plazo [27]. Por lo tanto, entender la estructura forestal no solo permite describir la biodiversidad del sistema, sino también interpretar su funcionalidad frente al cambio climático y su potencial como reservorio de carbono.

Las estimaciones de biomasa aérea realizadas mediante las tres ecuaciones alométricas empleadas

revelaron diferencias consistentes entre las parcelas evaluadas. Las parcelas 1 y 6 presentaron los valores más bajos de biomasa aérea, mientras que las parcelas 2 y 5 registraron las mayores acumulaciones (Cuadro 2). Este patrón se mantuvo para las tres ecuaciones utilizadas, lo que indica una tendencia clara en la distribución espacial de la biomasa en el área de estudio. La ecuación 3 que incluye diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total del árbol y densidad básica de la madera, proyectó los valores más elevados y se consideró la más precisa para estimar la biomasa aérea.

En contraste, las estimaciones obtenidas mediante la ecuación 1 mostraron variaciones atípicas respecto a los resultados de las ecuaciones 2 y 3, las cuales fueron consistentes entre sí para todas las parcelas. Esta discrepancia puede atribuirse a la ausencia de la variable altura en la ecuación 1, lo que limita su exactitud en ecosistemas tropicales húmedos, donde la estructura vertical supone un componente determinante en la acumulación de biomasa [27]. Debe señalarse que, en las parcelas 2, 3 y 5, los valores de biomasa aérea estimados mediante la ecuación 1 fueron superiores a los obtenidos con la ecuación 2. Esta diferencia podría atribuirse a posibles errores en la medición de la altura de los árboles en el campo, especialmente en estas parcelas, debido a la alta densidad del dosel arbóreo, lo que dificulta la visibilidad y precisión de las mediciones.

Diversos estudios corroboran que la inclusión conjunta de DAP, altura y densidad de la madera reduce el sesgo en las estimaciones y aumenta la precisión de los modelos alométricos, especialmente en regiones con alta heterogeneidad estructural [15]. No obstante, en este estudio se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 debido a que, en la mayoría de las estaciones y reservas biológicas de Costa Rica, no se registra la altura de los árboles en las mediciones rutinarias de crecimiento y biomasa, y tampoco se cuenta de forma sistemática con valores específicos de densidad de madera a nivel de especie (obs. pers.). Esta situación responde a limitaciones logísticas y de disponibilidad de recursos para la medición detallada en campo.

Al comparar la precisión entre las ecuaciones 1 y 3, se observó una subestimación de biomasa entre 22,6-31,7 %, mientras que entre las ecuaciones 2 y 3 el rango de subestimación fue de 16,9-32,8 %. Estos resultados evidencian que la inclusión de la altura total y la densidad de la madera contribuye significativamente a mejorar la exactitud de las estimaciones de biomasa, particularmente en bosques tropicales altamente heterogéneos. Por ello, se recomienda que futuros estudios incorporen sistemáticamente la medición de la altura de los árboles y la determinación de la densidad de la madera por especie, o bien que se apoyen en tecnologías emergentes como sensores LiDAR (escáner láser terrestre) o bases de datos para los trópicos de propiedades de la madera. Esta mejora metodológica

Cuadro 1. Especies forestales con mayor Índice de valor de Importancia (IVI) de las seis parcelas permanentes de medición (PPM).

Table 1. Tree species with the highest Importance Value Index (IVI) from the six permanent measurement plots (PPM).

Número	Familia	Especies	No. Individuos	Abundancia relativa	Dominancia relativa	Frecuencia relativa	IVI
1	Fabaceae	<i>Pentaclethra macroloba</i>	46	20,354	38,772	5,172	64,298
2	Anacardiaceae	<i>Tapirira guianensis</i>	6	2,655	9,445	3,448	15,548
3	Salicaceae	<i>Casearia arborea</i>	15	6,637	2,988	3,448	13,073
4	Araliaceae	<i>Dendropanax arboreus</i>	9	3,982	1,502	4,31	9,794
5	Burseraceae	<i>Protium spp.</i>	9	3,982	2,317	3,448	9,748
6	Meliaceae	<i>Carapa guianensis</i>	7	3,097	2,342	3,448	8,888
7	Vochysiaceae	<i>Vochysia ferruginea</i>	3	1,327	4,995	1,724	8,047
8	Salicaceae	<i>Laetia procera</i>	8	3,54	0,939	3,448	7,927
9	Rubiaceae	<i>Warscewiczia coccinea</i>	6	2,655	0,942	3,448	7,045
10	Urticaceae	<i>Pouroma bicolor</i>	3	1,327	1,894	1,724	4,946
11	Simaroubaceae	<i>Simaruba glauca</i>	2	0,885	2,254	1,724	4,864
12	Fabaceae	<i>Inga alba</i>	3	1,327	1,788	1,724	4,839
13	Melastomataceae	<i>Minquartia guianensis</i>	5	1,976	0,592	1,408	3,976
14	Moraceae	<i>Brosimum alicastrum</i>	3	1,186	1,381	1,408	3,975
15	Myristaceae	<i>Virola sebifera</i>	3	1,186	0,564	2,113	3,862

permitiría reducir el sesgo en las estimaciones y fortalecer las capacidades de monitoreo de carbono en ecosistemas tropicales, especialmente en el contexto de iniciativas como REDD+ y evaluaciones de servicios ecosistémicos.

Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango reportado para bosques tropicales maduros. Investigaciones previas en bosques lluviosos de Brasil, Venezuela, Panamá y Costa Rica han documentado valores de biomasa aérea entre 160 y 400 Mg ha⁻¹ [28]. De manera notable, estudios realizados en Ecuador utilizando LiDAR en combinación con ecuaciones alométricas completas, equivalentes a la ecuación 3, han reportado valores de hasta 664,1 Mg ha⁻¹ en bosques densos y no perturbados [29], lo que evidencia el potencial de tecnologías de alta precisión para la estimación de biomasa. En la región de Sarapiquí, Costa Rica, se han observado valores elevados (>400 Mg ha⁻¹) en bosques jóvenes, probablemente asociados a la dominancia de especies pioneras y a altas tasas de crecimiento durante etapas tempranas de sucesión [30].

En contraste, los bosques secos tropicales presentan valores considerablemente inferiores, que oscilan entre 30 y 250 Mg ha⁻¹ [31], evidenciando el efecto determinante de las condiciones climáticas y la disponibilidad hídrica sobre la productividad forestal. Estos resultados confirman que el uso de ecuaciones alométricas constituye un método eficiente y científicamente consistente para estimar biomasa aérea, al traducir variables de medición accesibles, tales como DAP y altura total, en indicadores cuantitativos del stock de carbono forestal [32]. Asimismo, la integración de estas herramientas con tecnologías de adquisición de datos estructurales, como el LiDAR, representa una oportunidad estratégica para fortalecer los sistemas de monitoreo y evaluación de bosques tropicales. Este enfoque resulta especialmente relevante en áreas con alto valor ecológico, como las estaciones y reservas biológicas, cuyo potencial como laboratorios naturales de investigación, conservación y seguimiento de procesos ecosistémicos se ve reforzado por la incorporación de métricas avanzadas para la estimación de biomasa y almacenamiento de carbono.

Índice de Valor de Importancia (IVI)

El análisis del Índice de Valor de Importancia (IVI) evidenció que *Pentaclethra macroloba* es la especie ecológicamente más relevante en el sitio de estudio (IVI = 64,3), seguida por *Tapirira guianensis* y *Casearia arborea*. Este patrón confirma que unas pocas especies concentran gran parte de la estructura forestal, un comportamiento ampliamente reportado en bosques tropicales húmedos maduros [33]. La dominancia de estas especies no solo refleja su capacidad competitiva en términos de luz, espacio y nutrientes, sino que también indica su alta contribución relativa a la acumulación de biomasa aérea y, por tanto, al almacenamiento de carbono.

Los resultados son congruentes con estudios previos en bosques maduros de la región de Sarapiquí, en donde *P. macroloba* también ha sido identificada como especie dominante [34]. Esta consistencia sugiere que su relevancia estructural está asociada a características funcionales como alta longevidad, tolerancia a la sombra y crecimiento sostenido, factores que favorecen su persistencia en etapas avanzadas de sucesión. Es por esto por lo que la identificación de especies con altos valores de IVI proporciona una herramienta estratégica para comprender qué componentes del bosque contribuyen mayormente al almacenamiento de carbono, lo cual resulta fundamental para el manejo forestal, la conservación y la modelación de biomasa en bosques tropicales lluviosos. En este sentido, especies dominantes como *P. macroloba* pueden aportar información relevante para la modelación del carbono y la estructura forestal, aunque su prioridad para estrategias de manejo debe ser evaluada según el contexto ecológico y los objetivos de conservación o uso del recurso.

Conclusiones

Este estudio demuestra que los bosques tropicales lluviosos maduros presentan un elevado potencial de almacenamiento de carbono, con estimaciones de biomasa en concordancia con valores regionales. Las ecuaciones que incorporan diámetro, altura y densidad

Cuadro 2. Biomasa aérea estimada (Mg/ha) en seis parcelas permanentes de medición PPM mediante tres ecuaciones alométricas.

Table 2. Estimated aboveground biomass (Mg/ha) in six permanent measurement plots (PPM) using three allometric equations.

Parcela	Ecuación 1 (Mg/ha)	Ecuación 2 (Mg/ha) (DAP y altura)	Ecuación 3 (Mg/ha) (DAP, altura y densidad específica)
1	128,61	137,51	166,18
2	220,85	211,22	301,22
3	196,47	182,71	271,88
4	194,81	203,21	285,13
5	222,11	199,62	295,91
6	132,67	145,49	175,03

de la madera ofrecieron mayor precisión, lo que evidencia la relevancia de incluir variables estructurales detalladas. Aunque especies como *Pentaclethra macroloba* desempeñan un papel dominante en la estructura y almacenamiento de carbono, su aplicación en restauración debe contextualizarse según metas de conservación. En conjunto, los resultados reafirman el valor de las reservas biológicas como sitios clave para investigación y monitoreo, y aportan información pertinente para fortalecer estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Agradecimientos

Agradecemos al Servicio de Intercambio Académico Alemán (DAAD) por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto correspondiente al programa Maestría en Ciencias Forestales del Tecnológico de Costa Rica (TEC). También agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) y al Centro de Investigación en Innovación Forestal (CIF) del TEC por el apoyo logístico y financiamiento a este proyecto de investigación. Extendemos nuestro agradecimiento a la Reserva Biológica Tirimbina por otorgar permisos de investigación y facilitar el acceso a las instalaciones para la realización del trabajo de campo, especialmente a Mariela García, Pablo Huertas y a Enrique Solano. También agradecemos a Ruperto Quesada y a Anahí Rodríguez por su colaboración y experiencia durante algunos muestreos de campo. Este proyecto fue realizado mediante el permiso de investigación R-SINAC-PNI-ACAHN-01-2025.

Referencias

- [1] L. Gibson, et al., “Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity,” *Nature*, vol. 478, no. 7369, pp. 378–381, 2011. doi: [10.1038/nature10425](https://doi.org/10.1038/nature10425)
- [2] Y. Pan, et al., “A large and persistent carbon sink in the world’s forests,” *Science*, vol. 333, no. 6045, Jul. pp. 988–993, 2011. doi: [10.1126/science.1201609](https://doi.org/10.1126/science.1201609)
- [3] M. García-Sánchez and P. González-Chaverri, “The Tirimbina Biological Reserve, in Costa Rica: model in the conservation of the tropical rain forest, scientific research, ecotourism and environmental education,” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 56, no. 2, pp. 242–253, 2022. doi: [10.15359/rca.56/2.13](https://doi.org/10.15359/rca.56/2.13)
- [4] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), “Estadísticas del Sistema Nacional de Áreas de Conservación,” 2025. Online en: SINAC – Estadísticas
- [5] Asociación de Reservas Naturales Privadas de Costa Rica, “Quiénes somos,” 2025. Online en: Asociación de Reservas Naturales Privadas de Costa Rica – Quiénes somos
- [6] Learning for Nature, “Costa Rica country profile: International outlook for privately protected areas,” 2025. Online en: Learning for Nature – Country Profile Costa Rica
- [7] P. Herzog and C. Vaughan, “Conserving biological diversity in the tropics: the role of private nature reserves in Costa Rica,” *Revista de Biología Tropical*, vol. 46, no. 2, pp. 183–190, 1998
- [8] J. Langholz, et al., “Incentives for biological conservation: Costa Rica’s private wildlife refuge program,” *Conservation Biology*, vol. 14, no. 6, pp. 1735–1743, 2000. doi: [10.1111/j.1523-1739.2000.99049.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2000.99049.x)
- [9] M. M. A. García and M. M. Calderón, “Estrategia de sostenibilidad para reservas naturales privadas. Estudios de caso en Costa Rica,” *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, vol. 4, no. 0, pp. 1–195, 2021. doi: [10.46380/rias.vol4.e106](https://doi.org/10.46380/rias.vol4.e106)
- [10] X. Chen, et al., “Effects of climate and plant functional types on forest above-ground biomass accumulation,” *Carbon Balance and Management*, vol. 18, no. 5, pp. 1–11, 2023. doi: [10.1186/s13021-023-00225-1](https://doi.org/10.1186/s13021-023-00225-1)
- [11] T. D. Gaudi, et al., “Biomass equations and carbon stock estimates for the southeastern Brazilian Atlantic forest,” *Forests*, vol. 15, no. 9, pp. 1–19, 2024. doi: [10.3390/f15091568](https://doi.org/10.3390/f15091568)
- [12] L. M. Vila, et al., “Above-ground biomass storage potential in primary rain forests managed for timber production in Costa Rica,” *Forest Ecology and Management*, vol. 497, pp. 1–14, 2021. doi: [10.1016/j.foreco.2021.119462](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119462)
- [13] M. Segura and M. Kanninen, “Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica,” *Biotropica*, vol. 37, no. 1, pp. 2–8, 2005
- [14] M. Rodríguez, et al., “Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* en Guanacaste, Costa Rica,” *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 15, no. 1 (Supl. Especial), pp. 61–68, 2018. doi: [10.18845/rfmk.v15i1.3723](https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3723)
- [15] Reserva Biológica Tirimbina, “Tirimbina – Research, Education and Ecotourism,” s.f. Online en: Tirimbina – Biological Reserve & Rainforest Lodge

- [16] R. Condit, "Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots". Berlin: Springer-Verlag, 1998. doi: [10.1007/978-3-662-03664-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03664-8)
- [17] H. Lamprecht, "Silviculture in the Tropics: Tropical Forest Ecosystems and Their Tree Species – Possibilities and Methods for Their Long-term Utilization". Eschborn, Alemania: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1989. 296 p
- [18] S. Brown, Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer, FAO Forestry Paper 134, FAO, 1997
- [19] J. P. M. et al., "Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest," Journal of Tropical Ecology, vol. 10, no. 2, pp. 207–218, 1994. doi: [10.1017/S0266467400007859](https://doi.org/10.1017/S0266467400007859)
- [20] J. Chave, et al., "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests," Oecologia, vol. 145, no. 1, pp. 87–99, 2005. doi: [10.1007/s00442-005-0100-x](https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x)
- [21] A. E. Zanne, et al., "Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum," Dryad Digital Repository, 2009. doi: [10.5061/dryad.234](https://doi.org/10.5061/dryad.234)
- [22] CIFOR-ICRAF, "CIFOR-ICRAF," 2025. Online en cifor-icraf
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, 2006, Online
- [24] F. C. Draper, et al., "Amazon tree dominance across forest strata," Nature Ecology & Evolution, vol. 5, no. 6, pp. 757–767, 2021. doi: [10.1038/s41559-021-01418](https://doi.org/10.1038/s41559-021-01418)
- [25] V. E. Mena-Mosquera, et al., "Composición florística, estructura y diversidad del bosque pluvial tropical de la subcuenca del río Munguidó, Quibdó, Chocó, Colombia," Entramado, vol. 16, no. 1, pp. 204–215, 2020. doi: [10.18041/1900-3803/entramado.1.6109](https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.6109)
- [26] A. Cascante and A. Estrada-Chavarría, "Composición florística y estructura de un bosque húmedo premontano en el Valle Central de Costa Rica," Revista de Biología Tropical, vol. 49, no. 1, pp. 213–225, 2001.
- [27] J. Chave, et al., "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical forests," Global Change Biology, vol. 20, no. 10, pp. 3177–3190, 2014. doi: [10.1111/gcb.12629](https://doi.org/10.1111/gcb.12629)
- [28] V. D. Selvas and T. A. Altitud, "Biomass variability in tropical American lowland rainforests," Ecotrópicos, vol. 18, no. 1, pp. 1–20, 2005.
- [29] V. González-Jaramillo, et al., "Estimation of above-ground biomass in tropical forests: a remote sensing approach," Remote Sensing, vol. 10, no. 5, article 660, pp. 1–26, 2018. doi: [10.3390/rs10050660](https://doi.org/10.3390/rs10050660)
- [30] S. G. Letcher and R. L. Chazdon, "Rapid recovery of biomass, species richness, and species composition in a tropical secondary forest," Biotropica, vol. 41, no. 5, pp. 608–617, 2009. doi: [10.1111/j.1744-7429.2009.00517.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00517.x)
- [31] J. Návar-Cháidez, et al., "Ecuaciones alométricas para árboles tropicales en bosques naturales del trópico mexicano," Agronomía Mesoamericana, vol. 24, no. 2, pp. 347–356 2013
- [32] B. Kebede and T. Soromessa, "Allometric equations for aboveground biomass estimation at different plant functional types of tropical dry Afromontane forests, Ethiopia," Ecosystem Health and Sustainability, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2018. doi: [10.1080/20964129.2018.1433951](https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1433951)
- [33] D. P. Edwards, et al., "Ecology: A few species dominate forest tree abundance pan-tropically," Current Biology, vol. 34, no. 6, pp. 251–254, 2024
- [34] R. L. Chazdon, et al., "Composition and dynamics of functional groups of trees during tropical forest succession in Costa Rica," Biotropica, vol. 42, no. 1, pp. 31–40, 2010. doi: [10.1111/j.1744-7429.2009.00566.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00566.x)