

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f.

Biomass and carbon prediction in clonal plantations of *Tectona grandis* L.f.

William Fonseca González^{1*} , Carlos Ávila Arias¹ , Rafael Murillo Cruz¹ ,
Marilyn Rojas Vargas² Fonseca-González, W., Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R. y Rojas-Vargas, M. (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24(1), 31-44.**Recepción:** 20 de febrero 2020**Aprobación:** 16 de septiembre 2020

Resumen

Los modelos matemáticos para predecir biomasa son en la actualidad una opción que facilita y mejora el cálculo de la capacidad de mitigación del cambio climático de un ecosistema, pues generan información fundamental para establecer índices nacionales de almacenamiento de carbono. El objetivo de este estudio fue evaluar la biomasa de los distintos componentes del árbol (hojas, ramas, fuste, raíz) por medio de método destructivo e indirecto para construir modelos predictivos de biomasa y carbono, generados por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios, cuyo diámetro normal fue la variable regresora. Las ecuaciones seleccionadas explicaron más del 94 % de la variabilidad observada en biomasa o carbono, con errores de estimados inferiores al 5 %. El fuste aportó el 57.4 % a la biomasa total del árbol y las hojas el 5 %. La fracción de carbono fue muy similar entre los componentes leñosos (ramas-fuste-raíz), variando de 44.9 % a 45.7 % y en las hojas alcanzó el 40.7 %.

Palabras clave: alometría, cambio climático, Costa Rica, reforestación, servicios ambientales.

Abstract

Mathematical models for biomass and carbon prediction are currently options that facilitate and improves the calculation of the climate change mitigation capacity of an ecosystem, by generating essential information to establish national carbon storage indices. The objective of the study was to evaluate the biomass of the different tree elements (leaves, branches, stem, root) through destructive and indirect methods, to construct predictive biomass and carbon models. The models were developed using the method of ordinary least squares, using the normal diameter as the regressor variable. These equations explained more than 94 % of the variability observed in biomass or carbon, with errors of estimates below 5 %. The stem contributed with 57.4 % to the tree total biomass, and the leaves contributed with 5 %. The carbon fraction was very similar among the woody components (branches -stem-root), which varied from 44.9 % to 45.7 % and in the leaves it reached 40.7 %.

Key words: allometry, climate change, Costa Rica, reforestation, environmental services.

1 Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Dirección postal 86-3000.

2 Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Dirección postal 86-3000. marilyn.rojas.vargas@una.ac.cr

* wfonseca@una.ac.cr. Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

El cambio climático producido por el calentamiento global es uno de los problemas más serios que afronta la población mundial (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 2013, 2014; Sreejesh *et al.*, 2013); y, desafortunadamente, por más opciones que se presentan para aportar su solución parece imposible a corto plazo. Una de las propuestas se centra en el mejoramiento del manejo de la tierra, pues se ha reportado un sustancial monto de secuestro de carbono tanto en la biomasa como en el suelo, con lo que se convierte en una alternativa real para reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera (Pastian *et al.*, 2000). Por ello, son bastantes las expectativas creadas sobre la función de los ecosistemas forestales como parte de la solución por su capacidad de secuestro de carbono (Basu, 2009; Le Quééré *et al.*, 2012), tanto en su tallo principal, madera, corteza, ramas, follaje y raíces. Lo anterior mantiene la esperanza en algunos grupos de ambientalistas, mientras otros ven como negocio el comercio del carbono. En todo caso, los llamados créditos verdes siguen generando controversia en diferentes sectores de la población; entre otras cosas, por la falta de información sobre la capacidad de secuestro de carbono de un ecosistema dado (Basu, 2009; Merger, 2008) en condiciones ambientales tan cambiantes como en el trópico.

Los bosques artificiales o plantados (plantaciones forestales puras y sistemas agroforestales) también proveen servicios ambientales útiles para la sociedad. En ese sentido, plantaciones jóvenes pueden secuestrar significativas cantidades de carbono atmosférico, mientras que las maduras se convierten en importantes reservorios (Sreejesh *et al.*, 2013). Especies de rápido crecimiento como *Tectona grandis* han tenido gran auge gracias a su madera de excelentes características físico-mecánicas, apta para gran variedad de usos (entre ellos los decorativos), ampliamente difundida en ambientes tropicales y de buen mercado y precio internacional.

En Costa Rica es la especie más plantada con fines de producción forestal; para el año 2017 se reportaron 45 853 ha (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2017). Además, es notorio que se realiza mucha investigación con dicha especie en temas como: mejora genética, reproducción, conservación del polen, necesidades nutricionales, etc. No obstante, su capacidad de mitigación del cambio climático en las condiciones actuales de producción (sistemas clonales principalmente) no ha sido un tema prioritario; adicional a ello, dicho potencial varía con respecto al material genético utilizado, el clima y suelo del sitio, así como el manejo realizado al sistema de producción (Sreejesh *et al.*, 2013). Este vacío de información, aunado a la política de C-neutralidad del Estado (Costa Rica, 2009; Kowollik, 2014), motivó la inversión de recursos para obtener datos sobre factores de expansión de biomasa, fracción de carbono en la biomasa y modelos matemáticos para estimar y pronosticar la biomasa y el carbono (todos objetivos de esta investigación). Esta información es básica para facilitar y mejorar la estimación de la reserva de carbono y se convierten, al mismo tiempo, en indicadores nacionales para dictar políticas y tomar decisiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio comprende el Pacífico norte, la zona norte y sur de Costa Rica, en sitios donde se ubican plantaciones establecidas con material clonal. Estos, generalmente, son inferiores a 10 años de edad; también hay de mayor edad con material de semilla seleccionada, pero con muy buen manejo silvicultural. Los sitios se caracterizan por presentar una variación térmica estacional fuerte, con un periodo seco de hasta seis meses; cuya precipitación promedio supera los 3200 mm anuales (1500-2500 mm en el Pacífico norte) y la temperatura media es mayor a 24 °C, elevada luminosidad,

con suelos predominantes del orden Inceptisol, Ultisol y Entisol ([Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2019](#)).

Evaluación de la biomasa

Dado el alto valor económico de la madera en la cuantificación de biomasa de *T. grandis* se emplearon tres técnicas, descritas a continuación:

- Método destructivo: consiste en derribar el árbol y pesarlo en campo (peso húmedo en kg) cada componente por separado (fuste, ramas, hojas y raíz). Esta práctica es más empleada para árboles de tamaño pequeño, sin valor comercial, o en árboles de porte mayor, pero cuyo propietario permitió subdividirlo en secciones pequeñas para facilitar su peso ([Parada et al., 2010](#)). De cada componente se tomó una muestra de aproximadamente de un kg para determinar la materia seca (a 60 °C durante 72 horas) y su respectiva fracción de carbono ([Fonseca et al., 2009](#)).
- En árboles derribados con madera aprovechable y que no se permitió hacer secciones pequeñas se determinó el volumen en secciones de dos metros con la fórmula de Smalian y, del mismo modo, la biomasa se calculó como el producto del volumen por la densidad específica de la madera ([Chave et al., 2004](#); [Petrokofsky et al., 2012](#); [Chave et al., 2014](#)). La densidad específica usada para la especie fue de 0.54 gr.cm⁻³ en función de lo reportado en la literatura ([Castro y Raïgosa, 2000](#); [Rodríguez et al., 2014](#)). La sección no comercial del fuste se pesó en el campo, al igual que el componente de hojas, ramas y raíz. También se recolectaron muestras de biomasa para determinar la materia seca en laboratorio.
- En plantaciones, independientemente de la edad y porte de los árboles en donde el propietario no permitió derribar los árboles, se determinó el diámetro en pie en secciones de dos metros con la ayuda de un dendrómetro modelo Criterion RD 1000. La biomasa del fuste se calculó según

lo indicado en el anterior punto. La biomasa total del árbol (incluida ramas, hojas y raíz) se calculó haciendo uso de factores expansión de biomasa ([Dixon, 1995](#); [Segura et al., 2000](#); [Segura y Kanninen, 2002](#)) calculados para los árboles derribados según lo indicado en los anteriores puntos.

El factor de expansión se utiliza para calcular la biomasa de componentes como ramas, hojas y raíz cuando se usa el método no destructivo. Es el cociente entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste, entre la biomasa del fuste y la biomasa de la raíz ([Fonseca et al. 2009](#); [Segura et al., 2000](#); [Segura y Kanninen, 2002](#)).

A cada árbol, independientemente de la técnica usada para determinar la biomasa, se le midió el diámetro normal a 1.3 m sobre el nivel del suelo (DAP). En cada sitio o plantación se trató de elegir individuos que abarcaran la amplitud diamétrica observada según la edad de la plantación. Para los árboles derribados se extrajo la raíz con una retroexcavadora y pulif (tipo teclé manual que funciona de forma horizontal); posteriormente, se lavó para eliminar componentes como piedra y tierra. Se continuó con el proceso de pesado aproximadamente dos horas después de secadas al aire.

Determinación de la fracción de carbono en biomasa

La muestra seca de cada componente de biomasa se trituró a 10 micras para determinar la materia orgánica. El análisis de esta se realizó haciendo uso de la metodología propuesta por [Walkley y Black \(1934\)](#).

Ajuste de modelos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphcs Centurion XVI. Se ensayaron aproximadamente 20 modelos para predecir la biomasa y el carbono de cada componente del

árbol (hojas, ramas, fuste, raíz), para la biomasa leñosa del árbol (fuste, ramas y raíz) y para el individuo total, usando como variable independiente el diámetro normal (DAP a 1.3 m sobre el nivel del suelo). El rango diamétrico osciló entre 1.1 cm y 47.2 cm.

En la selección de la ecuación de mejor ajuste se tomó como referencia la metodología expuesta por Salas (2002) y Segura y Andrade (2008), considerando los siguientes estadísticos: R² (coeficiente de determinación), EEE (error estándar de los estimados), EMA (error medio absoluto), DW (estadístico Durbin Watson), n (tamaño de la muestra), IF (índice de Furnival), E % (error del modelo o sesgo), AIC (criterio de información de Akaike). Además de esto, se calculó el ECM (error cuadrático medio), la DA (diferencia agregada) y el PRESS (la suma de cuadrados de los residuos de los predichos); estos últimos no se muestran en los resultados para simplificar la tabla en la cual aparecen los otros estadígrafos.

RESULTADOS

Proporción de biomasa por componente

El alto tamaño de muestra empleado en esta investigación (con un total de 503 observaciones) aseguró la representatividad de los individuos en toda

la amplitud diamétrica observada en las plantaciones evaluadas. El fuste registró el mayor aporte a la biomasa total del árbol (57.4 %), seguido por la raíz y las ramas; por su parte, la contribución de las hojas fue muy baja (5 %). La variabilidad observada entre el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total fue mínima, independientemente del tamaño del árbol; ello demuestra la desviación estándar y el error de muestreo, cuyo valor más alto fue de 8.06 % para las hojas (tabla 1).

Fracción de carbono por componente

Se registraron valores muy similares entre los componentes leñosos evaluados (ramas-fuste-raíz), los cuales variaron entre 44.9 % y 45.7 %, con una fracción de carbono en las hojas de 40.7 %. La variabilidad observada fue muy baja para las hojas, ramas y fuste y un poco más alta en la raíz; lo que sugiere que el cálculo de la fracción de carbono se realizó con bastante precisión, lo anterior reforzado por errores inferiores al 6.8 % (tabla 2). Las ecuaciones para estimar biomasa y carbono (tabla 3) producen variaciones en la fracción de carbono por componente dependiendo del diámetro normal de los árboles. Esta variación es mínima y en promedio representa 0.8; 0,4; -0,1 %, en el fuste, hojas y ramas-raíz, respectivamente; valores que están dentro del margen de error (E %) determinados para los modelos (tabla 3).

Tabla 1. Componentes de biomasa utilizados para desarrollar las ecuaciones de biomasa

Estadístico	Variable Dap (cm)	Biomasa por componente (kg)					
		Hojas	Ramas	Fuste	Raíz	Componente leñoso	Biomasa total
Mínimo	1.20	0.03	0.09	0.33	0.13	9.2	10.71
X (%)	22.37	24.06 (5.0)	73.73 (15.3)	276.36 (57.4)	107.09 (22.2)	457.12 (95.0)	481.24
Máximo	47.20	123.62	421.97	1590.3	603.02	2615.12	2203.72
SD	9.10	21.73	65.00	237.30	91.52	309.04	314.46
E (%)		8.63	4.15	4.07	8.06		5.8

X: promedio, SD: desviación estándar, E (%): error de muestreo.

Entre paréntesis y en negrita el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total. El tamaño de la muestra fue de 503.

Modelos predictivos de biomasa y carbono

La [tabla 3](#) y [figura 1](#) muestran las estimaciones de los parámetros y las estadísticas de bondad de ajuste tanto para el modelo elegido por árbol como por componente. Todas las estimaciones de los parámetros fueron significativas ($\alpha = 0.05$). A pesar de que todos

los modelos registraron buen ajuste en la biomasa total del árbol, en el componente leñoso (fuste y raíz) el valor de R^2 fue ligeramente superior; caso contrario para el EEE, EMA. Igual comportamiento se da en los modelos de carbono, pero con ligeras variaciones en el ajuste (R^2 más bajo), valores de EEE y EMA más altas y cifras de ECM, E (%) y AIC más bajas.

Tabla 2. Fracción de carbono (%) en la biomasa

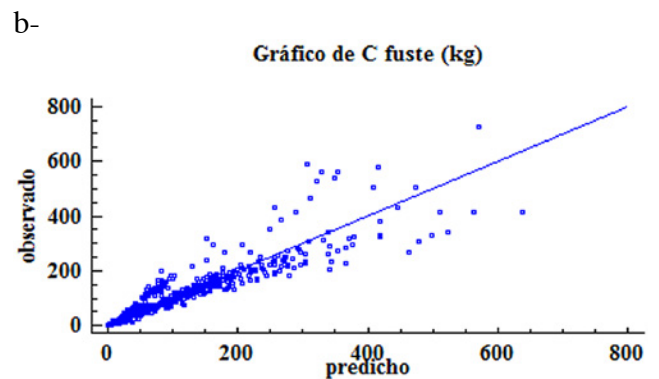
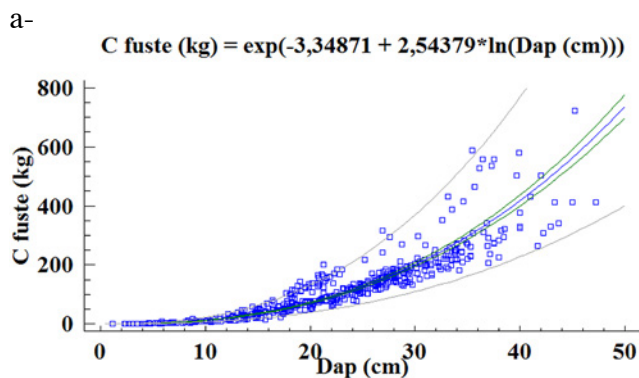
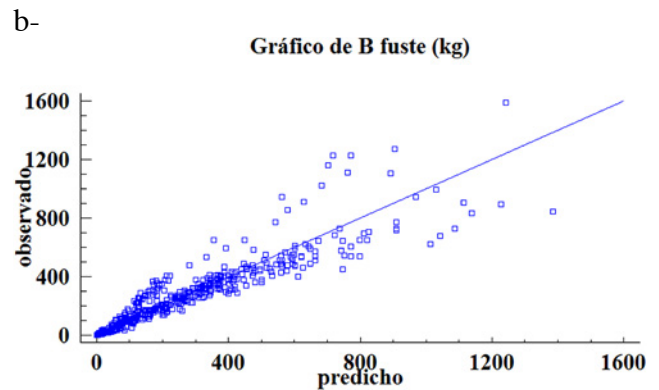
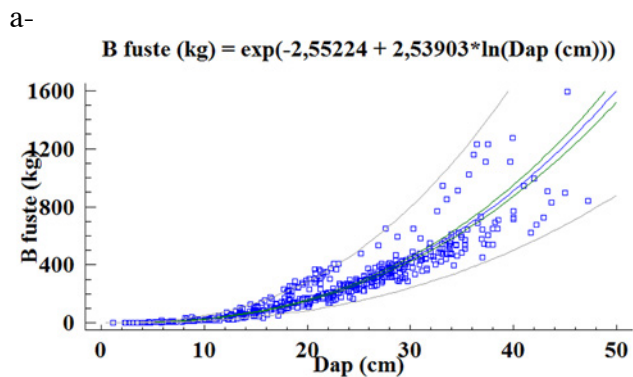
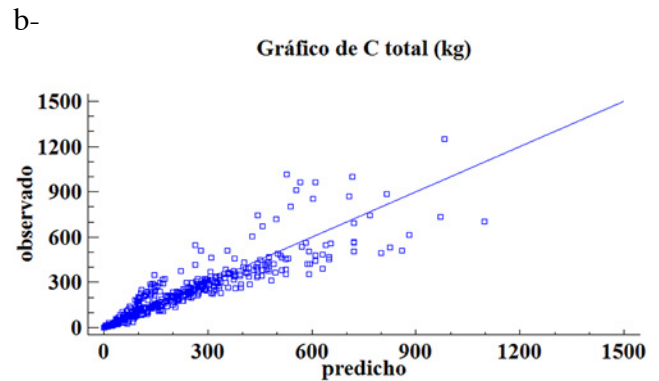
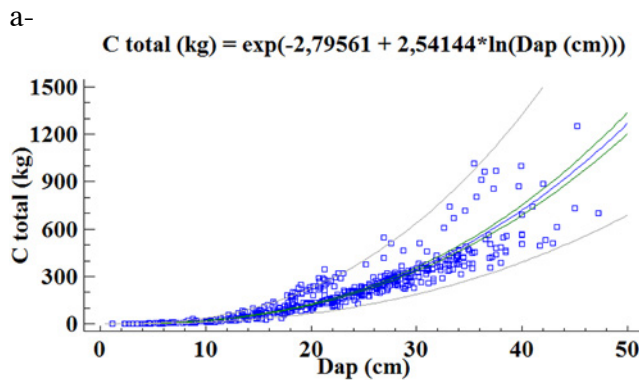
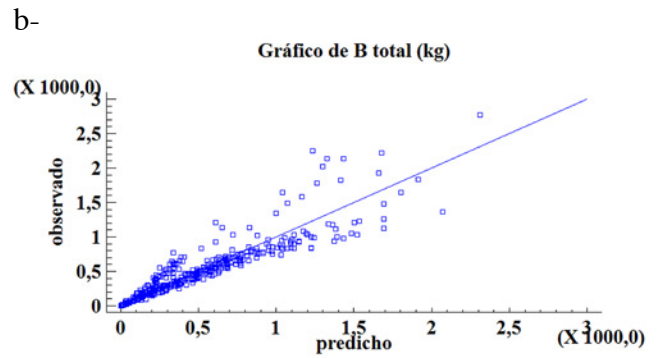
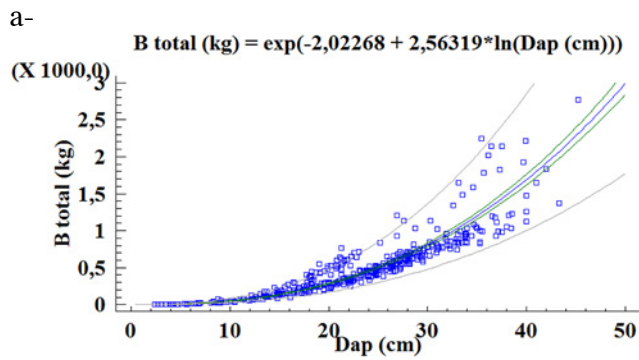
Estadístico	Hojas	Ramas	Fuste	Raíz
n	23	45	46	12
X	40.7	44.9	45.4	45.7
SD	2.7	3.1	2.9	4.9
E (%)	2.9	2.1	1.9	6.8

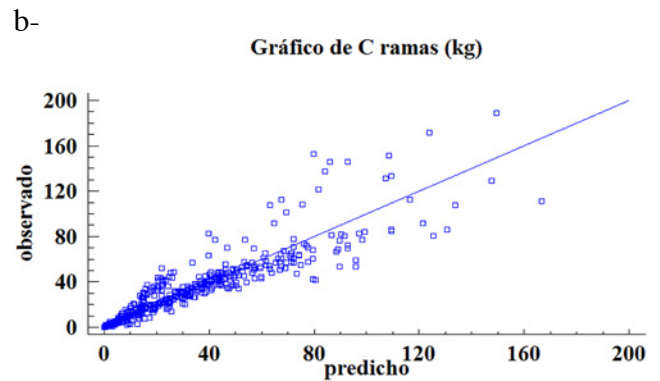
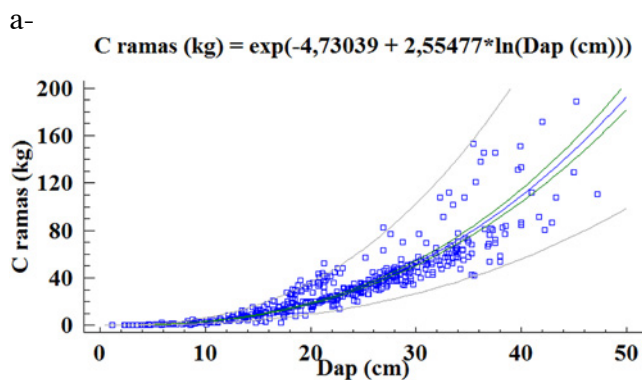
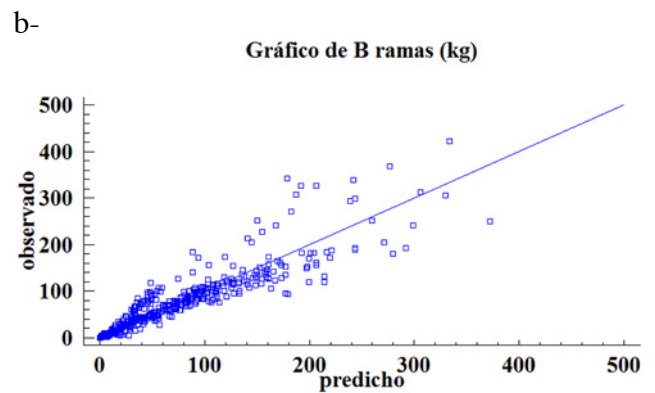
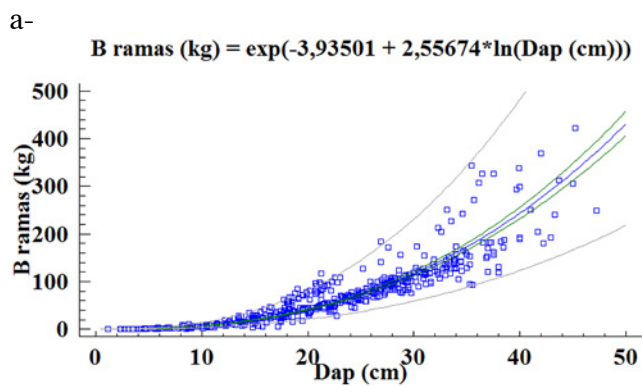
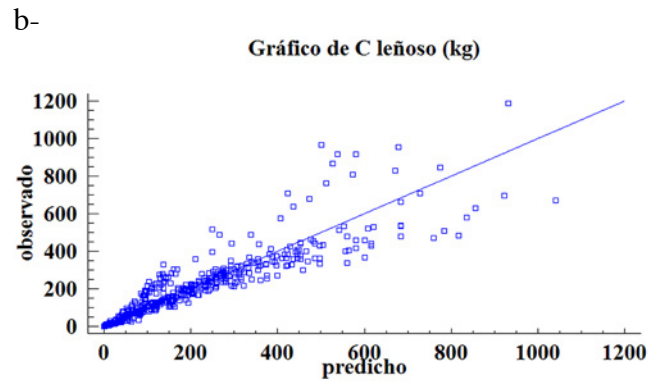
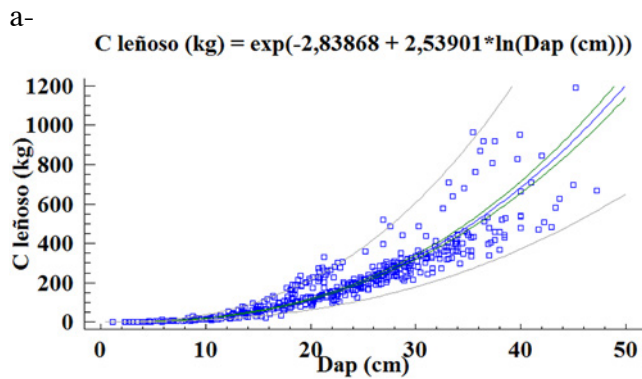
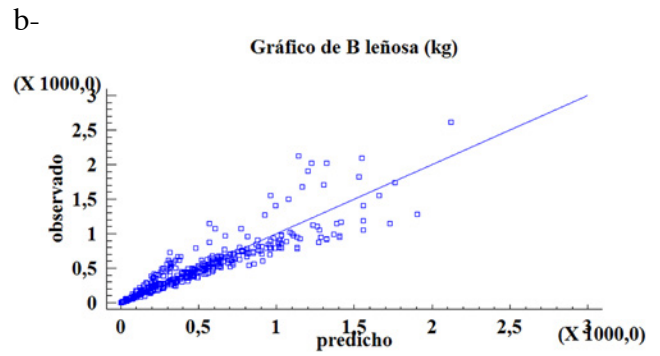
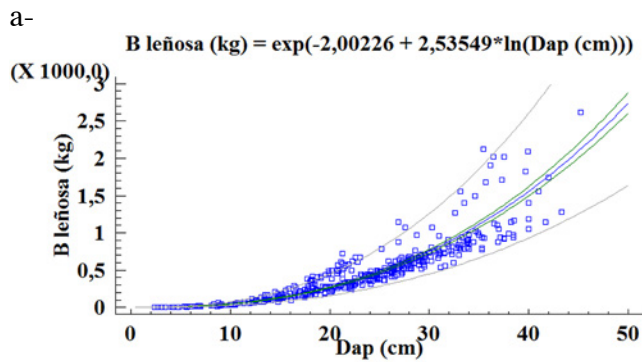
n: tamaño de la muestra; **X:** promedio; **SD:** desviación estándar; **E (%):** error de muestreo.

Tabla 3. Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo. Todos los modelos poseen una $P < 0.0001$. El tamaño de muestra fue de 503 individuos

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	ECM	IF	E %	AIC
B total = $\exp(-2.02268 + 2.56319 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.8	0.265	0.196	0.604 ($P < 0.0001$)	165.2	72.1	2.9	5.1
C total = $\exp(-2.79561 + 2.54144 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.1	0.310	0.226	0.802 ($P < 0.0001$)	83.3	38.1	3.8	4.4
B fuste = $\exp(-2.55224 + 2.53903 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.4	0.303	0.220	0.571 ($P < 0.0001$)	97.6	47.5	4.5	4.6
C fuste = $\exp(-3.34871 + 2.54379 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.2	0.309	0.225	0.839 ($P < 0.0001$)	47.7	22	3.9	3.9
B leñoso = $\exp(-2.00226 + 2.53549 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.7	0.261	0.192	0.603 ($P < 0.0001$)	161.8	67.1	3.4	5.1
C leñoso = $\exp(-2.83868 + 2.53901 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.1	0.310	0.226	0.801 ($P < 0.0001$)	79.2	36.2	3.8	4.4
B ramas = $\exp(-3.93501 + 2.55674 \cdot \ln(\text{Dap}))$	94.1	0.347	0.238	0.651 ($P < 0.0001$)	27.5	14.3	0.7	3.3
C ramas = $\exp(-4.73039 + 2.55477 \cdot \ln(\text{Dap}))$	94.3	0.341	0.234	0.885 ($P < 0.0001$)	12.5	6.3	3.7	2.5
B hojas = $\exp(-4.87697 + 2.52945 \cdot \ln(\text{Dap}))$	94.8	0.323	0.227	0.626 ($P < 0.0001$)	9.9	4.8	5.0	2.3
C hojas = $\exp(-5.77959 + 2.53203 \cdot \ln(\text{Dap}))$	94.7	0.325	0.229	0.742 ($P < 0.0001$)	4.0	2.0	4.7	1.4
B raíz = $\exp(-3.52804 + 2.54236 \cdot \ln(\text{Dap}))$	95.2	0.310	0.224	0.586 ($P < 0.0001$)	37.1	18.2	4.8	3.6
C raíz = $\exp(-4.27314 + 2.5296 \cdot \ln(\text{Dap}))$	94.5	0.328	0.234	0.778 ($P < 0.0001$)	18.8	8.8	3.8	2.9

B total-C total: biomasa-carbono del árbol completo; B fuste-C fuste: biomasa-carbono del fuste; B ramas-C ramas: biomasa-carbono de ramas; B raíz-C raíz: biomasa-carbono de raíz; B hojas-C hojas: biomasa-carbono de hojas; B leñoso-C leñoso: biomasa-carbono de componente leñoso; exp: exponente; Dap: diámetro normal a 1.30 m sobre el nivel del suelo (cm); ln: logaritmo natural; R^2 , EEE, EMA, DW, n, IF, E % y AIC fueron definidos en la metodología.





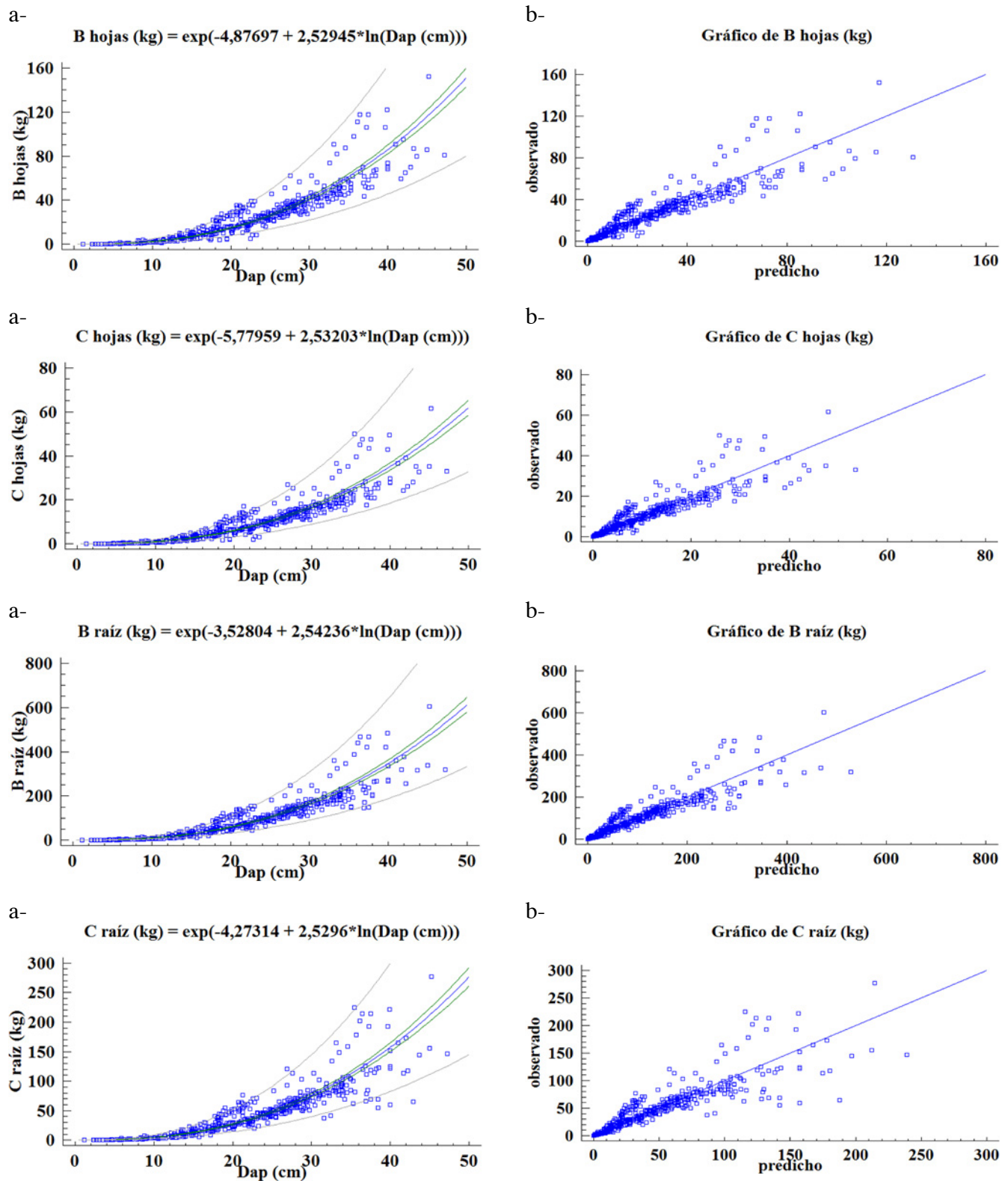


Figura 1. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo a partir del diámetro: a) el gráfico para el modelo ajustado, b) el gráfico de valores predichos vs observados.

Los resultados indican una fuerte relación positiva entre el diámetro y la biomasa o el carbono, la cual se confirma con el coeficiente de determinación (R^2). En este caso, para todos los modelos seleccionados, el diámetro explicó entre 94.1 % y 95.8 % de la varianza observada en biomasa o en carbono. El valor de los estadísticos EEE y EMA presentan cifras muy bajas (< 0.35), lo que evidencia un error máximo en la estimación de 0.35 kg, según el componente evaluado. En todos los casos el error o sesgo fue igual o inferior al 5.1 %, condición que se observa en la [figura 1b](#) al ubicarse la nube de puntos muy cercana a la línea de tendencia central.

DISCUSIÓN

Proporción de biomasa por componente (factor de expansión de biomasa)

La proporción de componentes en la biomasa aérea varía según las especies ([Blujdea et al., 2012](#); [Mensah et al., 2016](#); [Sreejesh et al., 2013](#)). De la misma manera, conforme el árbol crece el aporte relativo a la biomasa aérea del fuste y las ramas aumentan; mientras que el de la de hoja y corteza disminuye. Según [Mensah et al. \(2016\)](#) y [Pajtki et al. \(2011\)](#), la biomasa leñosa generalmente se acumula a expensas de la biomasa de la hoja, asignando más recursos para madera y ramas a medida que aumenta el tamaño con el objetivo promover la altura y el crecimiento de la copa para superar la competencia por la luz con los árboles vecinos.

En este estudio el fuste representó el 57.4 % y las ramas el 15.3 % de la biomasa total, ambos con corteza. [González et al. \(2014\)](#) reportan para la misma especie una contribución inferior para el fuste pero mayor para las ramas (39.6 % y 28.6 %, respectivamente). Por su parte, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) reportaron que un 75 % de la biomasa total correspondía a la suma de fuste y ramas, a los cinco años de edad, valor muy similar al aquí generado. Resulta pertinente mencionar la contribución de las raíces (22.2 %), componente que (por

la dificultad para ser evaluado) en la mayoría de las investigaciones es desestimado. [Sreejesh et al. \(2013\)](#) registraron un valor de 12 % para esta parte del árbol; lo que es significativamente inferior al aquí generado.

Estos valores siguen el mismo patrón demostrado para otras especies en el mundo. Autores como [Vargas et al. \(2017\)](#) reportan que la biomasa en el tallo de pino varió de 63 % (*Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.) a 80.9 % (*Pinus lumholtzii* B.L.Rob. & Fernald) y las ramas el 14.9 %. En el caso de roble, el fuste acumuló el 59.5 % (*Quercus rugosa* (Masam.) J.C.Liao) y 65.3 % (*Quercus durifolia* Seemen) y las ramas el 22.2 %. Para *Eucalyptus grandis* el 88.8 % del carbono aéreo se encuentra en el fuste y el 8.9 % en las ramas ([Ramírez y Chagna, 2019](#)).

El follaje es el componente del árbol con menor aporte (5.0 % en este estudio), cifra consistente con lo reportado en la literatura: 3.3 % en *Pinus* y 4.0 % en *Quercus* ([Vargas et al., 2017](#)); 2.36 % en *Eucalyptus grandis* W. Hill ([Ramírez y Chagna, 2019](#)); 3.6 % en abedul (*Betula pubescens* Ehrh); 2.6 % en roble ([Gómez et al., 2013](#)); y 3 % en *Eucalyptus* ([Cerruto et al., 2015](#)).

Según [Dimobe et al. \(2018\)](#), el porcentaje de biomasa foliar disminuye conforme aumenta el diámetro del árbol. Ello debido a que las hojas se producen en las ramas más jóvenes, lo que implica que la masa de follaje por unidad de masa de rama disminuya a medida que los árboles crecen. De la misma manera, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) registraron cambios significativos en el aporte de los distintos componentes a medida que avanza la edad.

Fracción de carbono por componente

La concentración de carbono promedio de la biomasa de los diferentes componentes, obtenida en este estudio, se encuentra dentro de los límites reportados para otras especies, tanto en la nación como en otros países (fuste 45.5 %, ramas 44.9 %, hojas 40.7 % y raíz 45.7 %). Al respecto, [Sreejesh et al. \(2013\)](#) reportaron fracciones de carbono muy

similares a las aquí generadas: 46 % en promedio para fuste y ramas y 40 % para raíz; adicionalmente reportaron la de corteza con 32 %. Por su parte, López *et al.* (2018) determinaron en Guatemala un factor de conversión de la biomasa a carbono de 0.5311.

Para Costa Rica se reporta en *Alnus acuminata* Kunth, para todos los componentes, entre 37 % y 44.4 % (Fonseca *et al.*, 2013); así como para *Vochysia guatemalensis* Standl entre 43 % y 48.6 % y entre 45.9 % y 49.2 % para *Hieronyma alchorneoides* Allem. (Fonseca *et al.*, 2012).

Modelos predictivos de biomasa y carbono

El ajuste logrado en los modelos elegidos se considera muy satisfactorio para todos componentes. El valor más bajo de R^2 obtenido fue de 0.94 para hojas y ramas; por su parte, el más alto corresponde a 0.95 para la biomasa total (tabla 3). Los datos generados se encuentran dentro del intervalo reportado en estudios similares por diferentes autores. Para *T. grandis* se reportan muy pocos estudios similares que permitan comparar la bondad de la metodología empleada y los resultados obtenidos. En ese sentido, Malimbwi *et al.* (2016) reportaron modelos para predecir biomasa en plantaciones para la especie, a partir del diámetro normal, para un rango diamétrico entre 6 cm y 84.4 cm y registraron valores de R^2 superiores a 0.91; el valor inferior se obtuvo para las ramas (0.87), situación similar a la presentada en la presente investigación. Por su parte, Ruiz *et al.* (2019) registraron valores de R^2 promedio de 0.99 para los modelos generados para hojas, ramas, fuste y la biomasa total; no obstante ese buen ajuste, el error estándar obtenido fue de hasta 0.2561.

Lo más cercano para esta especie fue desarrollado por Pérez y Kanninen (2003) para Costa Rica, pero con árboles producidos con semilla y con un manejo de la plantación poco intensivo (característico de las décadas de 1980 y 1990, cuando apenas iniciaba el cultivo de la madera). Esta situación

resalta la pertinencia de los resultados obtenidos en la presente investigación.

Pérez y Kanninen (2003), con una muestra de 40 árboles, generaron modelos para el árbol y por componente con ajustes muy satisfactorios ($R^2 > 85\%$), la cifra más baja para las hojas, muy similar a lo obtenido en este estudio ($R^2 > 94\%$). Mientras que López *et al.* (2018), también con teca, para una plantación de 14 y 15 años desarrollaron un modelo de predicción de biomasa del fuste con un R^2 ajustado de 0.89 usando como variables independientes el diámetro y la altura.

El follaje y ramas son componentes que muestran una correlación inferior con el diámetro, pues presentan ajustes inferiores al fuste, a la raíz o árbol completo. Esta situación se dio en el presente estudio y ha sido demostrado por Fonseca *et al.* (2009), quienes lograron ajustes (R^2) de 0.89 y 0.92 para hojas y ramas y cifras mayores a 0.98 para la raíz, fuste y árbol completo, esto con *Vochysia guatemalensis*; o de 0.9 para hojas y ramas y mayor a 0.95 para los otros componentes para *Hieronima alchorneoides*. Según Muñoz *et al.* (2008), la biomasa de las fracciones de copa se consideró la más difícil de modelar.

El mismo comportamiento ocurre con modelos para especies en bosque natural. Para este ecosistema Fonseca *et al.* (2019) lograron ajustes de 0.87 y de 0.93 para hojas y ramas respectivamente, y un R^2 mayor a 0.94 para los otros componentes (incluyendo la biomasa leñosa y el árbol completo). Por su parte, Jiménez *et al.* (2019) lograron ajustes similares ($R^2 = 0.96$) para todos los componentes con *Guazuma ulmifolia* Lam. en bosque natural y en sistema silvopastoril.

CONCLUSIONES

Se ratifica que los modelos alométricos son opciones prácticas para estimar o predecir la biomasa o el carbono en los ecosistemas forestales. El modelo elegido para cada componente del árbol y para el

árbol completo presentó una bondad de ajuste muy buena ($R^2 > 94\%$) con bajo error de estimación ($E < 5\%$). Tiene la ventaja de la simplicidad en su uso por utilizar como variable predictora el diámetro, el cual es muy fácil de medir e indispensable para muchos cálculos en el área forestal; además de estimar la biomasa o el carbono con precisión y confiabilidad si es usada en ecosistemas similares y para el rango de distribución diamétrica con que fue desarrollada. Así mismo, otra información pertinente como la fracción de carbono en la biomasa y los factores de expansión se convierten en indicadores nacionales que, junto con los modelos alométricos, permiten y facilitan calcular con mayor exactitud el aporte del ecosistema a la mitigación del cambio climático. Se debe tener especial atención al aporte de cada componente del árbol a la biomasa total al asignar recursos para cuantificarlos, pues el follaje es el componente al que se le debe asignar menor esfuerzo y recursos para inventariarlo.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado con el aporte financiero de la Universidad Nacional de Costa Rica, a través del Fondo de Investigación para el Desarrollo Académico (FIDA) y con el apoyo de los propietarios de las plantaciones, quienes facilitaron y permitieron la recolección de información de campo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

Los autores son los únicos responsables de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS

- Basu, P.** (2009). A green investment. If growing forests in India can generate lucrative carbon credits, then why isn't everyone planting trees? News Feature. *Nature*, 457, 8, 144-146.
- Blujdea, V. N. B., Pili, R., Dutca, I., Ciuvat, L. y Abrudan, V.** (2012). Allometric biomass equations for Young broadleaved trees in plantations in Romania. *Forest Ecology and Management*, 264, 172-184. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>
- Castro, F. y Raigosa, J.** (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24(2), 07-23.
- Cerruto, S., Boechat, C., Fehrmann, L., Gonçalves, L. A. y von Gadow, K.** (2015). Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in Southeast Brazil. *Revista Arvore. Minas Gerais: Sociedade de Investigações Florestais*, 39, 2, 353-363. <http://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S. y Pérez, R.** (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, (359)1443, 409-420. <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>
- Chave, J., Réjou, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eis, T., Fearnside, P., Goodman, R., Henry, M., Martínez, A., Mugasha, W., Mullerlandau, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J. y Vieilledent.** (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical forests. *Global Change Biology*, 20, 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Dimobe, K., Mensah, S., Goetze, D., Ouédraogo, A., Kuyah, S., Porembski, S. y Thiombiano, A.** (2018). Aboveground biomass partitioning and additive models for *Combretum glutinosum* and *Terminalia*

- laxiflora* in West Africa. *Biomass Bioenergy*, 115, 151-159.
- Dixon, R.** (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems*, 31, 99-116. <https://doi.org/10.1007/BF00711719>
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M.** (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002009000100006>
- Fonseca, W., Rey-Benayas, J. M. y Alice, F.** (2012). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43, 197-211. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M. y Alice, F.** (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(2), 37-50. <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Fonseca, W., Villalobos, R. y Rojas, M.** (2019). Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 111-131. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.6>
- Gómez, G. E. F., Crecente, C. y Diéguez, A. U.** (2013). Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. *Madera y Bosques*, 19(1), 71-91.
- González, Á. J., Rojas, J., Jiménez, R. M. y Chavarría, F. J.** (2014). Evaluación del crecimiento, potencial de secuestro y fijación de carbono de dos especies forestales en el Sistema Agroforestal Taungya en Rivas, Nicaragua. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(26), 12-18. <http://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica** (2019). *Clima en Costa Rica: Clima de Costa Rica y variabilidad climática*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos** (2017). *Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria*. Recuperado de <https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/coena20112018.pdf>
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)** (2013). *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)** (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC Working Group II Contribution to AR5. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Jiménez, E., Fonseca, W. y Pazmiño, L.** (2019). Sistemas silvopastoriles y cambio climático: Estimación y predicción de biomasa arbórea. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 45-55. <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.04>
- Kowollik, M.** (2014). Costa Rica carbono neutral: un país pequeño con metas grandes. Friedrich Ebert Stiftung (FES) América Central. *Perspectivas*, 8, 2-5. Recuperado de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/11122.pdf>
- Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., [...] y Zeng, N.** (2012). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data Discussions*, 5, 1107-1157. <https://doi.org/10.5194/essdd-5-1107-2012>.
- López, H., Estuardo, E. y Alvarado, A.** (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137-153.
- Malimbwi, R., Eid, T. y Chamshama, S.** (2016). *Allometric volume and biomass models in Tanzania*. Morogoro, Tanzania: Department of Forest

- Mensuration and Management, Sokoine University of Agriculture.
- Mensah, S., Kakaï, R. G. y Seifert, T.** (2016). Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: The effects of tree size and specific functional traits. *Annals Forest Research*, 59, 1-12.
- Merger, E.** (2008). *Forestry Carbon Standards 2008. A comparison of the leading standards in the voluntary carbon market and the state of climate forestation projects*. Recuperado de <http://www.carbonfix.info/chameleon/outbox/public/55/Forestry-Carbon-Standards-Canterbury-University-Eduard-Merger-2008.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones de Costa Rica** (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. San José, Costa Rica: Editorial Calderón y Alvarado.
- Muñoz, F., Rubilar, R., Espinosa, M., Cancino, J., Toro, J. y Herrera, M.** (2008). The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 365-73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.063>
- Pajtík, J., Konopka, B. y Lukac, M.** (2011). Individual biomass factors for beech, oak and pine in Slovakia: A comparative study in young naturally regenerated stands. *Trees*, 25, 277-288. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0504-z>
- Parada, S., Gallegos, A., Velázquez, M. y Hernández, E.** (2010). Guía para la medición de biomasa en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L.f.) y cedro (*Cedrela odorata* L.) para determinar su potencial de captura de carbono. CUCBA. Departamento Forestal. Universidad de Guadalajara, México.
- Pastian, K., Six, J., Elliott and, E. T. y Hunt, H. W.** (2000). Management options for reducing CO₂ emissions from agriculture soils. *Biogeochem*, 48, 147-163. <https://doi.org/10.1023/A:1006271331703>
- Pérez, L. D. y Kanninen, M.** (2003). Above-ground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 15(1), 199-213. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/23616336>
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonen, A., Menton, M., Pullin, A. y Wattenbach, M.** (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 1(6), 1-21. <http://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>
- Ramírez, L. J. y Chagna, E.** (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1), 86-97.
- Rodríguez, R., Zamora, J. F., Silva, J. A., Salcedo, E. y Fuentes, F. J.** (2014). Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 13-25.
- Ruiz, B., Hernández, E., Salcedo, E., Rodríguez, R., Gallegos, A., Valdés, E. y Sánchez, R.** (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L. f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29.
- Salas, C.** (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque*, 23(2), 81-92. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- Segura, M. y Andrade, H.** (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96.
- Segura, M. y Kanninen, M.** (2002). Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales. En *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. Serie Técnica, Manual Técnico N.º 50.
- Segura, M., Kanninen, M., Alfaro, M. A y Campos, J. J.** (2000). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 30, 3-28.
- Sreejesh, K. K., Thomas, T. P., Rugmini, P., Prasanth, K. M. y Kripa, P. K.** (2013). Carbon Sequestration Potential of Teak (*Tectona grandis*) Plantations in

Kerala. *Research Journal of Recent Sciences*, 2, 167-170.

Statgraphics Centurion XVI (s.f.). *Downloads: Statgraphics Centurion XVI*. Recuperado de <http://www.statgraphics.com/download-statgraphics-centurion-xvi>

Vargas, L. B., López, C. A., Corral, J. J., López, J. O., Aguirre, C. G y Álvarez, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass

and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico. *Forests*, 8(269), 2-20.

<https://doi.org/10.3390/f8080269>

Walkley, A. y Black, A. I. (1934). An examination of the method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.

