

Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales

Biomass and carbon models for *Gmelina arborea* trees in clonal plantations

William Fonseca-González¹, Rafael Murillo-Cruz², Carlos Ávila-Arias³,
Marilyn Rojas-Vargas⁴, Romeo Manuel Spínola Parallada⁵

[Recibido: 26 de febrero 2020, Aceptado: 14 de mayo 2020, Corregido: 25 de setiembre 2020, Publicado: 1 de enero 2021]

Resumen

[Introducción]: La evaluación de la biomasa y el desarrollo de modelos es un elemento clave para determinar el potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales. Los bosques plantados año tras año ocupan mayor área, también adquieren mayor relevancia en el almacenamiento de carbono, pero existe poca información sobre la cuantificación de biomasa y carbono para la diversidad de especies, sitios y grado de manejo. **[Objetivo]:** El objetivo del estudio fue evaluar la biomasa de los distintos componentes o fracciones (hojas, ramas, fuste, raíz) del árbol. **[Metodología]:** Por medio del método destructivo e indirecto, para construir modelos predictivos de biomasa y carbono para los distintos componentes del árbol. Los modelos se desarrollaron por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios que utiliza como variable predictora el diámetro normal. **[Resultados]:** Estas ecuaciones explicaron más del 92 % de la variabilidad observada en biomasa y el carbono, con errores de estimados inferiores a 8.5 %, excepto para el carbono en hojas con menor ajuste ($R^2 = 78.2$) y mayor error (10.9 %). El fuste representó el 65.6 % de biomasa total del árbol, tiene 37 % de materia seca y 0.48 de fracción de carbono. **[Conclusiones]:** El aporte del follaje a la biomasa y carbono total del árbol es mínimo, por lo cual debería justificarse muy bien la asignación de tiempo y recursos para evaluar este componente. Los modelos elegidos son muy prácticos de usar porque requieren solo del diámetro como variable predictora.

Palabras clave: Alometría; cambio climático; *Gmelina arborea*; mejoramiento genético; reforestación.

Abstract

[Introduction]: Assessing biomass and model development is key in determining the mitigation potential of climate change in forest ecosystems. Forests planted year after year occupy a greater area and are becoming more relevant for carbon storage; however, there is little information about biomass and carbon quantification for the diversity of species, sites, and management degree. **[Objective]:** The objective of the study was to evaluate the biomass of the different tree components (leaves, branches, stem, root). **[Methodology]:** The study used the destructive and indirect

- 1 Instituto de Investigación y Servicios Forestales-Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. wfonseca@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-4546-9035>
- 2 Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. rafael.murillo.cruz@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-5326-3563>
- 3 Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. carlos.avila.arias@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-4592-2637>
- 4 Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. marilyn.rojas.vargas@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0001-7051-8399>
- 5 Instituto Internacional en Manejo y Conservación de Vida Silvestre, Universidad Nacional, Costa Rica. mspinola@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-7839-1908>



method to build predictive models of biomass and carbon for the different tree components. Models were developed with the ordinary least squares method using the normal diameter as a predictor variable. **[Results]:** These equations explained more than 92 % of the variability observed in biomass and carbon, with errors of the estimates below 8.5 %, except for carbon in leaves, which had less adjustment ($R^2 = 78.2$) and greater error (10.9 %). Stem represented 65.6 % of the tree's total biomass, with 37 % dry matter and 0.48 carbon fraction. **[Conclusions]:** Foliage contribution to total tree biomass and carbon is minimal; consequently, allocating time and resources to evaluate this component should be well justified. The models chosen are very practical to use because they only require the diameter as a predictor variable.

Keywords: Allometry; climate change; genetic improvement; *Gmelina arborea*; reforestation.

1. Introducción

Los bosques representan el 30 % de la superficie emergida de la tierra y las plantaciones el 3.8 % del área de bosques (140 millones de ha) (FAO, 2018), la región tropical presentó una pérdida neta de bosques en el periodo 2000-2010 de 7 millones ha, mientras las plantaciones para el mismo periodo sumaron 3.1 millones de ha (FAO, 2016). El bosque plantado, desde tiempos ancestrales provee a la sociedad múltiples bienes y servicios, tales como empleo rural, conservación de la biodiversidad, protección del suelo, regulación del ciclo hidrológico, etc. (Cabrera, 2003), y más recientemente, se les reconoce su capacidad para el secuestro de carbono (Salinas y Hernández, 2008).

Gmelina arborea es una especie tropical, que ocupa actualmente, el segundo lugar en área reforestada en Costa Rica con 13 314 ha (INEC, 2018), se caracteriza por su rápido crecimiento, con un incremento medio en volumen por el orden de 20 hasta 35 $m^3 ha^{-1}$ (Jiménez, 2016); su madera es usada en diversidad de usos: estructural en construcciones livianas, carpintería general, empaque, tallados, muebles comunes y chapas decorativas, instrumentos musicales, palitos de fósforo, tableros de partículas, puntales de minas, carrocerías, botes y para la fabricación de productos para embalaje (Rojas *et al.*, 2004; Jiménez, 2016).

En Costa Rica, el desarrollo de estudios tendientes a consolidar paquetes tecnológicos de silvicultura clonal para el manejo forestal de esta especie data desde los años noventa, es por ello, que la mayor parte del área hoy plantada proviene de reproducción vegetativa. Distintos autores concuerdan que, la producción clonal, a partir de un enfoque genético, potencia la productividad y la calidad de la materia prima producida por unidad de área (Kumar, 2007; Murillo *et al.*, 2013), lo que conlleva a un incremento en la capacidad de la especie para mitigar el cambio climático y aportar sustancialmente, en la reducción de la brecha entre oferta y demanda.

La producción de biomasa para melina ha sido poco investigada, y menos para plantaciones con silvicultura intensiva; dada la importancia de la especie en Costa Rica y en concordancia con el plan de descarbonización de la economía (MINAE, 2018), se hace necesario proveer herramientas que faciliten el cálculo del *stock* de carbono.



Además, la cuantificación de las fracciones de biomasa es importante para el manejo sostenible y para la producción de bioenergía. Con este fin, se desarrolló un estudio cuyo objetivo fue desarrollar modelos matemáticos para estimar-predecir la biomasa y el carbono por árbol y sus componentes (hojas, ramas, tronco, raíz), y aportar información adicional como factores de expansión de biomasa, porcentaje de materia seca y fracción de carbono en la biomasa.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El estudio comprendió 3 zonas en Costa Rica: norte, pacífico norte y sur; en aquellos sitios en donde se ubicaron plantaciones establecidas con material clonal, con edad entre 1 y 8 años. En el norte se trabajó en los cantones Guatuso, Los Chiles, San Carlos y Upala que poseen un clima lluvioso todo el año, la precipitación media anual es de 3 056 mm y la temperatura media de 24 °C. En el pacífico norte (distrito Cóbano) la precipitación promedio es de 1 888 mm al año y la temperatura media de 27 °C. En el sur, el distrito Puerto Jiménez registra una precipitación promedio de 3 650 mm al año y la temperatura media 26 °C (Costa Rica, 2014).

2.2 Evaluación de la biomasa

Los árboles elegidos para cuantificar la biomasa se seleccionaron aleatoriamente, de forma proporcional a la frecuencia por rango diamétrico (rango de 5 cm), según el estado silvicultural de las plantaciones evaluadas. La madera de melina, aún con un diámetro pequeño que logra a temprana edad, es muy usada para fabricar productos para embalaje (tarimas), por lo cual, en la cuantificación de la biomasa del fuste se emplearon dos técnicas:

2.2.1 El método destructivo

Consiste en derribar el árbol y pesar en el campo (peso húmedo o verde en kg) cada componente por separado (fuste, ramas, hojas y raíz), práctica usada para árboles de tamaño pequeño sin valor comercial o en árboles de porte mayor, pero que el propietario permitió subdividirlo en secciones pequeñas para facilitar su pesado. De cada componente se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg para determinar la materia seca (a 60 °C durante 72 horas) y la fracción de carbono (Fonseca, Alice y Rey-Benayas, 2009). La cantidad de árboles cortados fue de 85.

2.2.2 El método del análisis fustal

Se utiliza para obtener información sobre el crecimiento en volumen del árbol a través de los años. En este caso el mismo fue derribado y se pesó en campo sus componentes, luego se extrajeron discos a cada metro sobre su eje hasta el ápice. Se cubió el árbol en secciones de un



metro con la fórmula de Smalian y la biomasa se calculó como el producto del volumen por la densidad específica de la madera (Chave *et al.*, 2014).

La densidad específica usada para la especie fue de 0.4 gr/cm³, cifra mayormente citada en la literatura (Rojas *et al.*, 2004; Muñoz y Berrocal, 2005). La biomasa total del árbol (incluida ramas, hojas y raíz), a diferente edad, se calculó haciendo uso de factores expansión (Fonseca *et al.*, 2009) calculados para los árboles derribados, según lo indicado en el apartado 2.2.1.

A cada árbol, independientemente de la técnica usada para determinar la biomasa, se le midió el diámetro a la altura del pecho a 1.3 m sobre el nivel del suelo (Dap) y en cada sitio o plantación se trató de elegir individuos abarcando la amplitud diamétrica observada, según la edad. La raíz se extrajo con una retroexcavadora o pulift (tipo tecla 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.

2.3 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 (MO). Este análisis se realizó haciendo uso de la metodología propuesta por Walkley y Black (1934).

2.4 Ajuste y selección de modelos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphcs Centurion XVI. Se ensayaron aproximadamente, 15 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).

Cuando algún modelo presentó heterogeneidad de varianza se ajustó con la función \ln_{robust} del paquete estadístico Estmatr. En la selección de la ecuación de mejor ajuste se tomó como referencia la metodología expuesta por Salas (2002) y Segura y Andrade (2008), tomando en consideración los siguientes estadísticos: R² (coeficiente de determinación), EEE (error estándar de los estimados), EMA (error medio absoluto), DW (estadístico Durbin Watson), IF (índice de Furnival), E % (error del modelo o sesgo), AIC (criterio de información de Akaike). Adicionalmente, 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 el cuadro donde aparecen los otros estadígrafos.



3. Resultados

3.1 Biomasa del árbol y de sus componentes (factor de expansión de biomasa)

En el estudio se utilizaron 125 observaciones, provenientes de mediciones de biomasa directas e indirectas, abarcando la amplitud diamétrica observada en las plantaciones evaluadas que osciló entre 3.9 y 39.8 cm. La representación de la muestra por clase de tamaño varió entre 10 % y 32 % para las clases diamétricas de entre 5 y 30 cm y menor a 5 % para los rangos mayor a 30 y menor de 5 cm.

El fuste tiene el mayor aporte (65.6 %) a la biomasa total del árbol, seguido por la raíz y las ramas, la contribución de las hojas fue muy baja (3.15 %). La variabilidad observada entre el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total fue alta, más baja en hojas y ramas, con cifras muy similares; en el fuste y la raíz se presenta mayor variabilidad, ambos con valores prácticamente iguales (**Cuadro 1**).

3.2 Materia seca y fracción de carbono por componente

La fracción de materia seca varió de 0.32 (SD=0.02) en hojas a 0.44 (SD=0.06) en ramas, mientras el carbono de 0.39 (SD=2.7) en hojas a 0.48 (SD=3.3) en fuste; en ambos casos existe muy poca variabilidad en la muestra lo que resulta en errores de muestreo inferiores al 4 % para la materia seca y máximo 8 % para la fracción de carbono (**Cuadro 2**), en este caso, el reducido tamaño de la muestra (9) pudo haber incrementado este valor.

Cuadro 1. Componentes utilizados para desarrollar las ecuaciones de biomasa. Entre paréntesis y en negrita, el aporte porcentual de cada componente a la biomasa total.

Table 1. Components used to develop the biomass equations. In brackets and in bold the percentage contribution of each component to the total biomass.

Valor	Variable						
	Dap (cm)	Biomasa por componente (kg)					Biomasa total
		Hojas	Ramas	Fuste	Raíz	Componente leñoso	
N	125	125	125	125	125	125	125
Mínimo	3.9	0.37	1.07	4.66	1.51	7.62	7.25
X	18.69	9.03 (3.15)	29.63 (10.33)	188.00 (65.60)	59.92 (20.91)	277.55 (96.85)	286.58
Máximo	38.9	51.43	169.22	1598.12	518.22	2285.73	2337.16
SD	7.69	9.56	35.23	286.45	92.98	412.42	420.13
E %	7.36	18.93	21.27	27.26	27.76	26.58	26.22

n: tamaño de la muestra, X: promedio, SD: desviación estándar, E %: error relativo de muestreo.





Cuadro 2. Materia seca y fracción de carbono (entre paréntesis) por componente.
Table 2. Dry matter and carbon fraction by component.

Estadístico	Materia seca			
	hojas	ramas	fuste	raíz
n	46 (20)	46(20)	46 (21)	34(9)
X	0.32(0.39)	0.44(0.46)	0.37(0.48)	0.37(0.45)
SD	0.02(2.7)	0.06(3.2)	0.03(3.3)	0.05(4.6)
E %	2.13(3.2)	3.99(3.2)	2.80(3.0)	4.60(7.9)

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

3.3 Modelos predictivos de biomasa y carbono

Los modelos elegidos con sus respectivos estadísticos se presentan en el **Cuadro 3**. El diámetro, como variable independiente mostró una correlación muy alta ($R > 0.96$) con la biomasa y el carbono, excepto con el carbono en hojas que fue de 0.88. Para todos los modelos los parámetros de la regresión fueron significativos ($\alpha = 0.05$), lo cual indica que el Dap como variable independiente explica significativamente, la predicación de variable dependiente (biomasa o carbono).

El EEE y EMA poseen valores muy similares y muy bajos, que significa un error máximo en la estimación de 0.49 kg por árbol, según sea el componente evaluado. Los resultados del coeficiente de determinación (R^2) indicaron que el diámetro explicó entre 91 % y 93 % de la varianza observada en la biomasa (el valor más para el componente ramas) y entre 78.2 % y 93.7 % de la varianza observada en el carbono (el valor más para el componente hojas).

La prueba de Durbin Watson y el método gráfico (no existe evidencia de un comportamiento sistemático en la distribución de los residuos) indican que no existe autocorrelación entre los residuos, es decir, no se viola el principio de normalidad. El Índice de Fournival, calculado para comparar modelos lineales con otros con variable dependiente transformada, muestra valores bajos, así como el AIC con un valor máximo de 4.93.

La bondad de predicción de los modelos evaluada en función DA (considerado como sesgo) y el error (la raíz cuadrada de ECM), como medidas de variabilidad presentan valores bajos que se ven reflejados en errores también bajos, el más alto de 10.9 % para carbono en hojas, esto se comprueba con la **Figura 1b**, al observarse, que en todos los casos, la nube de puntos se ubica muy cerca de la línea central indicando que los modelos generan estimaciones con poco sesgo.



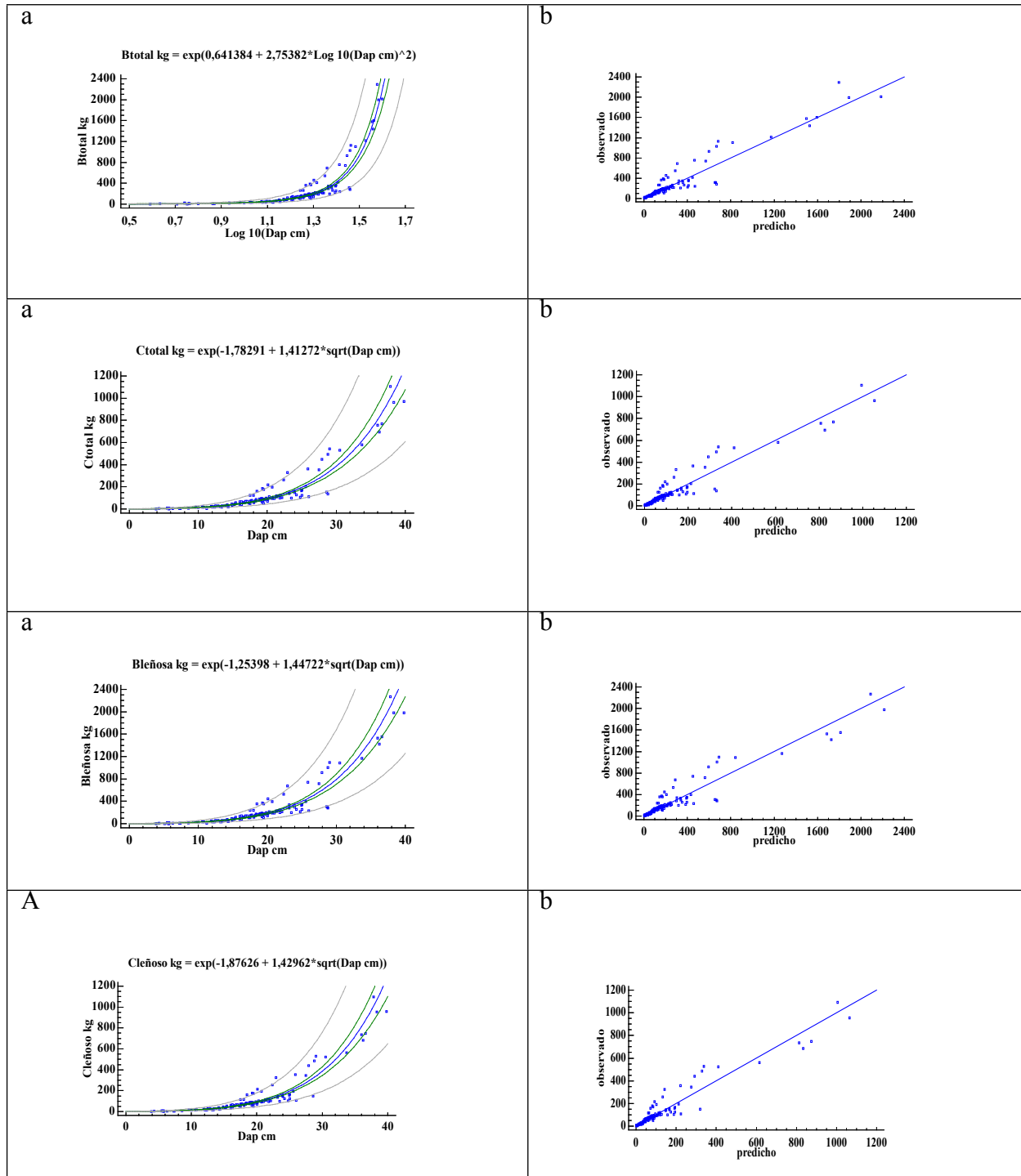
Cuadro 3. Modelos para estimar biomasa (kg) y carbono (kg) para distintos componentes del árbol, para el árbol completo y volumen (m³) del fuste. El tamaño de la muestra fue de 125 y todos los modelos poseen una P<0,0001.

Table 3. Models for estimating biomass (kg) and carbon (kg) for different components of the tree, for the complete tree and volume (m³) of the shaft. The sample size was 125 and all models have a P<0.001.

Modelo	R ²	EEE	EMA	DW	ECM	DA	IF	E%	AIC
Btotal = exp(0.641384 + 2.75382*Log10(Dap)^2)	93.0	0.3642	0.2667	1.0432	127.4	15.4	48.3	6.5	102.9
Ctotal = exp(-1.78291 + 1.41272*√Dap)	92.4	0.3637	0.2679	1.1872	63.6	2.6	24.4	5.7	100.1
Bleñoso = exp(-1.25398 + 1.44722*√Dap)	93.0	0.3761	0.2776	1.2104	137.6	0.5	46.6	8.5	111.6
Cleñoso = exp(-1.87626 + 1.42962*√Dap))	93.4	0.3383	0.2557	1.1994	62.0	1.3	20.7	5.5	84.2
Bfuste = exp(-1.65997 + 1.44652*√Dap)	93.0	0.3634	0.2715	1.0241	88.9	6.0	31.2	5.2	100.8
Cfuste = exp(-2.44019 + 1.469*√Dap)	93.7	0.3464	0.2633	1.1543	45.8	0.4	14.5	5.7	97.9
Bramas = exp(-4.09297 + 2.46917*ln(Dap))	91.0	0.3761	0.2766	0.9682	13.6	2.4	5.0	7.2	103.6
Cramas = exp(-4.87134 + 2.4727*ln(Dap))	91.6	0.3723	0.2756	0.9814	6.3	1.1	2.9	6.9	101.4
Braíz = exp(-2.93555 + 1.4845*√Dap)	93.0	0.3681	0.2779	1.3056	31.7	64.9	4.4	5.8	103.0
Craíz = exp(-3.70087 + 1.47675*√Dap)	93.4	0.3563	0.2669	1.2242	13.4	0.3	4.4	3.5	93.8
Bhojas = (-0.412307 + 0.174547*Dap)^2	93.0	0.2975	0.2273	1.7127	3.3	0.6	0.3	2.4	80.2
Chojas = exp(-4.74832 + 1.99501*ln(Dap))	78.2	0.4948	0.3357	1.0234	2.2	0.4	1.2	10.9	161.4

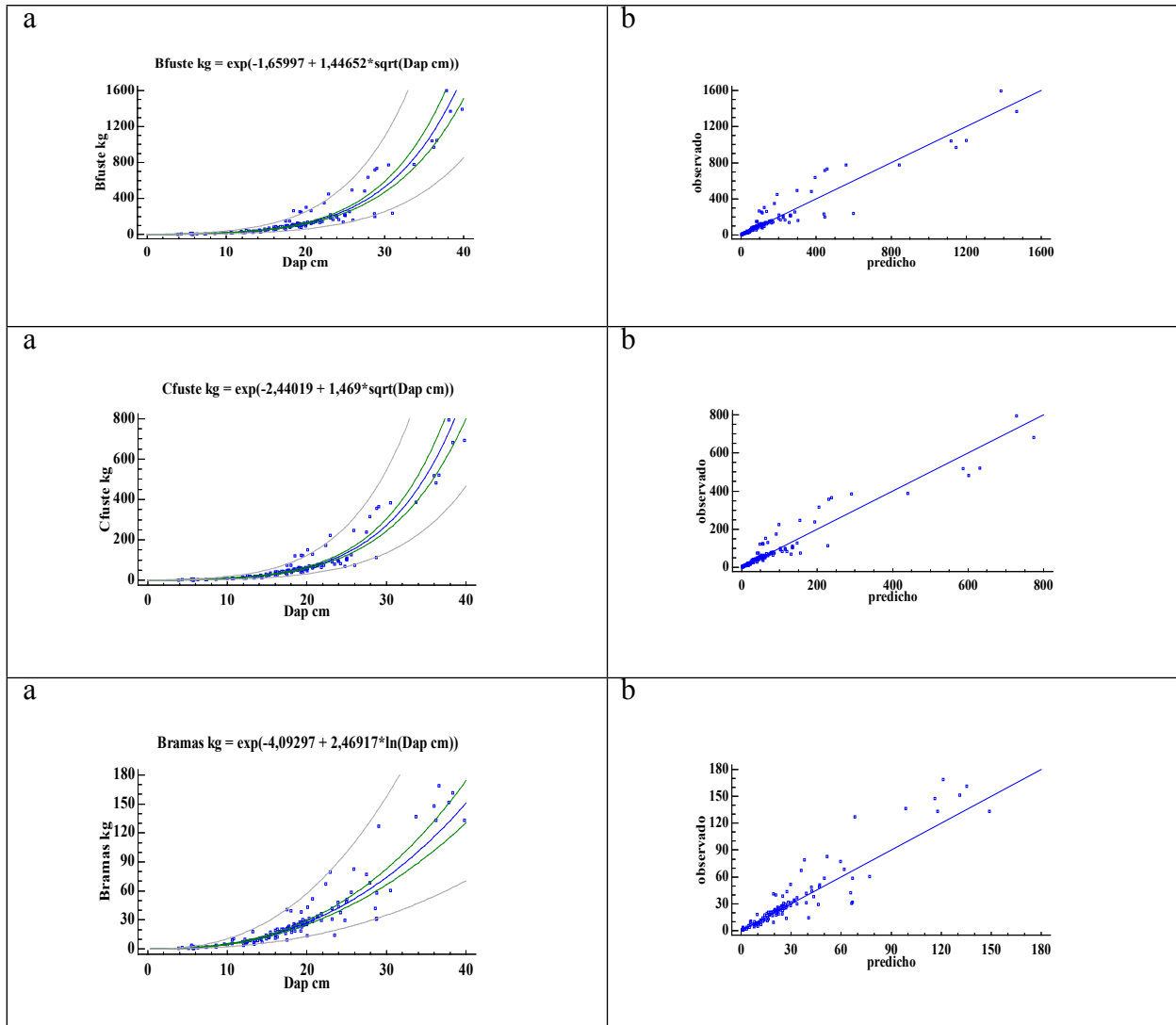
Btotal-C total: biomasa-carbono del árbol completo, Bleñoso-C leñoso: biomasa-carbono de componente leñoso, Bfuste-C fuste: biomasa-carbono del fuste, Bramas-C ramas: biomasa-carbono de ramas, Braíz-C raíz: biomasa-carbono de raíz, Bhojas-C hojas: biomasa-carbono de hojas, exp: exponente, Dap: diámetro normal a 1,30 m sobre el nivel del suelo (cm), ln: logaritmo natural, R, R², EEE, EMA, DW (=0.0000), n, IF, E % y AIC definidos en la metodología.





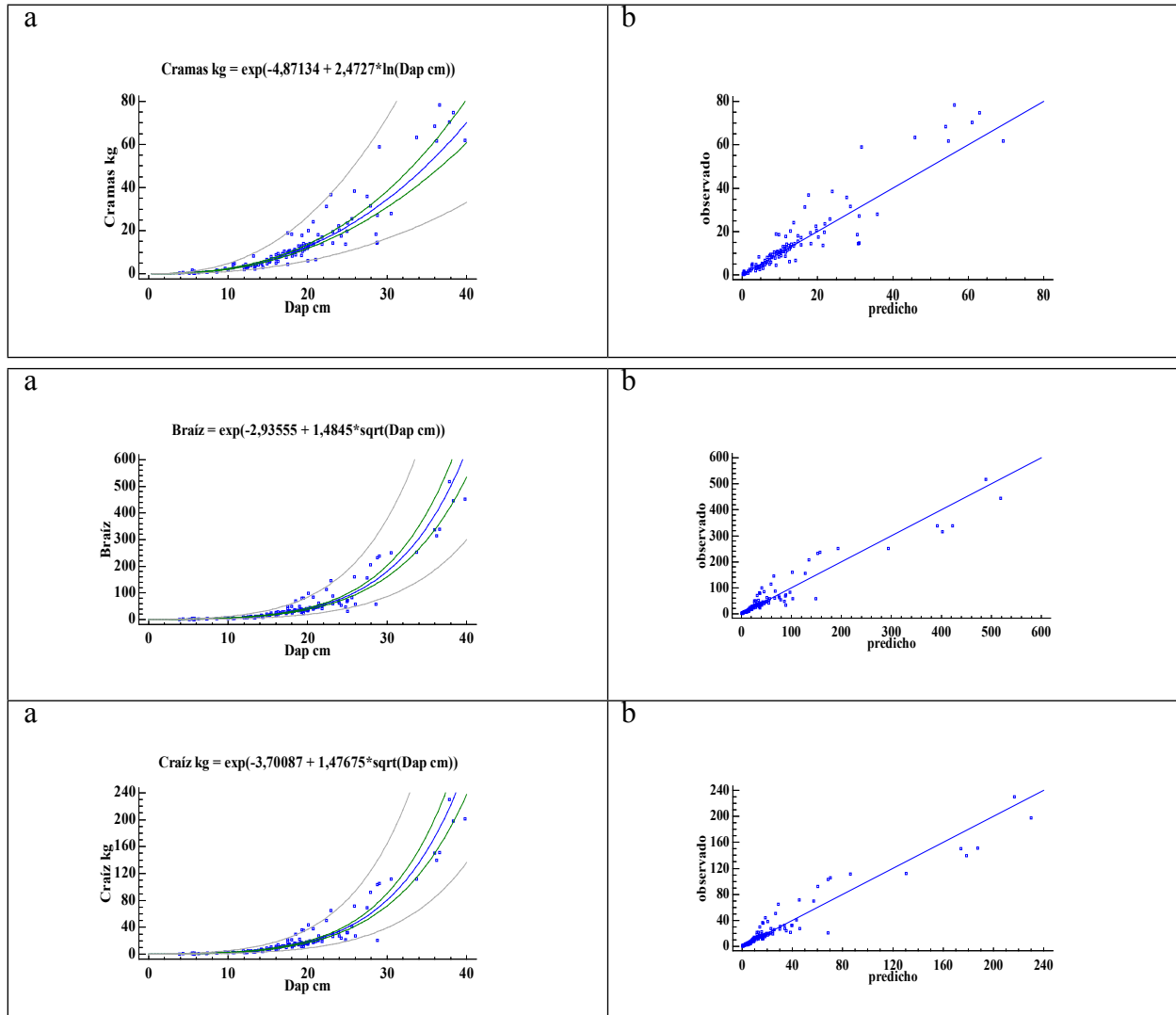


Cont. Figura 1





Cont. Figura 1



Cont. Figura 1

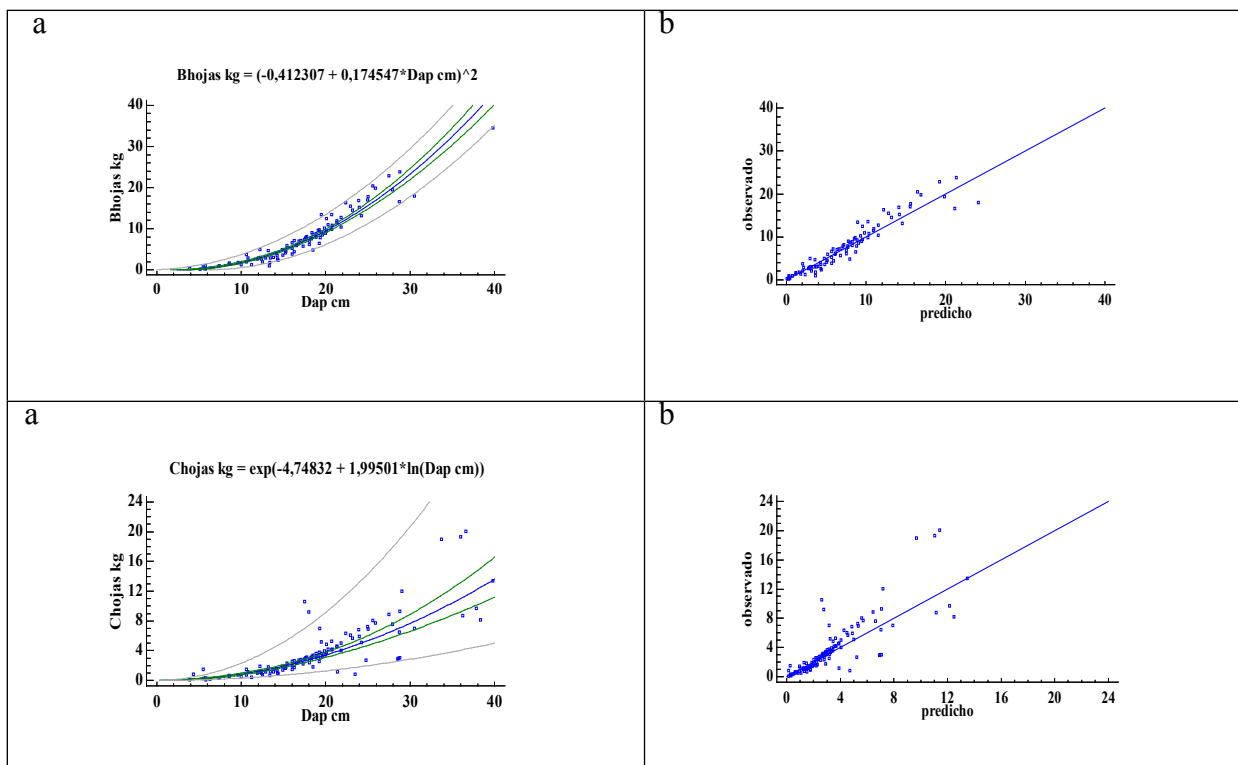


Figura 1. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo a partir del diámetro: a) el gráfico para el modelo ajustado, b) el gráfico de valores predichos vs observados.

Figure 1. Models for estimating biomass and carbon per tree and whole tree component from the diameter: a) the graph for the fitted model, b) the graph of predicted vs. observed values.

4. Discusión de resultados

4.1 Biomasa del árbol y de sus componentes (factor de expansión de biomasa)

La proporción de los componentes en la biomasa aérea varía según las especies (Blujdea *et al.*, 2012; Mensah *et al.*, 2016). En este estudio, el fuste con corteza acumuló el 65.6 % (83 % de la biomasa aérea) de la biomasa total, las ramas el 15.3 %, las raíces un 20.9 %, cifra muy similar a la reportada por Jiménez *et al.*, (2018) para la biomasa en el fuste (89.6 %) y 10.4 % el follaje y ramillas en melina de 3 años, valores muy similares a los citados por Onyekwelu (2004) para árboles entre 5 y 21 años (tallo 84 %; rama 13 % y follaje 3 %).

Mientras Swamy, Kushwaha & Puri (2004), encontraron que entre 1 y 6 años, el tallo aportó entre 55.3 % y 56.3 % (sitio 3 y 1), las ramas de 18.3 % al 19.8 % (sitio 2 y 3), las raíces del 17.9 %



al 18.5 % (sitio 3 y 2) y el follaje de 6.6 % a 7.0 % (sitio 2 y 3), de la biomasa total. Según [Mensah et al. \(2016\)](#) el mayor aporte del fuste a la biomasa total del árbol se debe a que 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 aumentar la competencia por la luz con los árboles vecinos.

Información sobre la cantidad de biomasa en las raíces, en *G. arborea* y para otras especies, es nula o poco frecuente en la literatura, a pesar de ser un componente que acumula un porcentaje alto de la biomasa total del árbol, 20.9 % en este estudio y 14.3-15.3 % según [Lin et al. \(2017\)](#), para bosque natural, y de mantener el carbono almacenado por más tiempo en comparación con las ramas y el follaje. Posiblemente, la dificultad y el alto costo que conlleva la extracción del sistema radical ([Schlegel, 2001](#), [Sierra et al., 2011](#)), desmotiva investigar este componente con más frecuencia.

La contribución de cada componente del árbol a la biomasa total en *G. arborea* sigue el mismo patrón reportado para especies como *Pinus oocarpa*, *Pinus lumholtzii*, *Quercus rugosa* y *Quercus durifolia* ([Vargas et al., 2017](#)).

4.2 Materia seca y fracción de carbono por componente

La materia seca correspondió a 37 % en el fuste y raíz, 44 % y 32 % en ramas y hojas, respectivamente, similar a lo reportado por [Jiménez et al., 2018](#) (42.1 % en el fuste, 50.1 % en el follaje y 37.6 % en la corteza (siendo esta parte la que mayor humedad acumuló). Para *Pinus caribaea* y *Cupressus lisitanica*, la materia seca es más alta, corresponde a 43.7 % y 41.6 % en hojas, respectivamente, 52.3 % y 47.8 % en ramas, 50.7 % y 42.3 % en el fuste y de 44.4 % y 44.4 % en la raíz ([Rojas, 2014](#)).

La concentración promedio de carbono en los diferentes componentes varió de 39 % en hojas a 48 % en el fuste, similar a lo reportado para *Tectona grandis* ([Fonseca et al., 2020](#)), con 40.7 % y 45.9 % en hojas y fuste, respectivamente. Cifras que también, están dentro de lo reportado por [Rojas \(2014\)](#) para *P. caribaea* (de 47.5 % en hojas a 49.4 % en ramas) y de 32.7 % en hojas a 52.7 % en fuste para *C. lusitanica*.

4.3 Modelos predictivos de biomasa y carbono

Los modelos elegidos tienen solo como variable independiente el diámetro, que en diversidad de estudios ha mostrado alta correlación con la biomasa, el carbono o el volumen, mostrando ajustes (R^2) muy satisfactorios ([Quirós, 2015](#); [Jiménez et al., 2018](#); [Jiménez et al., 2019](#)), presenta la ventaja de que su medición es muy precisa, simple de realizar, no requiere mucho conocimiento y el equipo usado para realizar la medición es simple y económico, si se compara con la medición de la altura.

Todos los modelos presentan muy buen ajuste ($R^2 > 91$ %), excepto el carbono en hojas con un 78.2 %. Para la misma especie con 3 años de edad y proveniente de rebrotes, [Jiménez](#)



et al. (2018) desarrollaron un modelo para determinar la biomasa aérea total en estado verde en función del diámetro normal y altura total y lograron un ajuste R^2 mayor a 0.96. *Rodríguez et al.* (2018), con información de plantaciones de *G. arborea* con edades de 4 y 9 años, desarrollaron modelos con un R^2 de 0.65 a 0.82 con valores de CME (cuadrado medio del error) inferior a 124.0.

Mientras *Wayne et al.* (2017) eligió el mejor con un R^2 de 0.68 para árboles de 7 años de edad, e indica que la predicción de la biomasa en *G. arborea*, se ve afectada por factores como la densidad y el uso de material genético natural (semilla) o mejorado (clones). También, *Melo* (2015) desarrolló modelos de regresión múltiple, por componente y para el árbol completo, con R^2 entre 0.9 y 0.99, los más bajos para hojas y ramas.

El ajuste en la biomasa de hojas y ramas en este trabajo fue muy similar al de los otros componentes (fuste, raíz), contrario de lo ocurrido en otros estudios, en donde para las ramas y hojas no lograron obtener ajustes satisfactorios (*Vargas et al.*, 2017; *Fonseca et al.*, 2009).

En relación con la bondad de predicción, los modelos elegidos mostraron ser muy confiables con sesgos y errores inferiores a 15.4 % y 10.9 %, respectivamente. Al respecto, *Henry et al.* (2010) citado por *Jiménez et al.* (2018), indica, para estimar biomasa en plantaciones forestales, los modelos con errores mayores a 20 % no son funcionales, porque sobre o subestiman la biomasa. *Husch* (1963), cita que un modelo es aceptable cuando presenta una diferencia agregada (DA) no superior o inferior a ± 5 %, y un error cuadrático medio (ECM) que no supere el 10 %.

5. Conclusiones

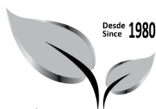
El aporte de cada componente del árbol, a la biomasa total, es un valor muy importante para considerar en la planificación de inventarios de carbono; queda demostrado que el follaje debería ser el componente al cual se le asigne menor esfuerzo para inventariarlo, además de que representa un carbono de muy corta permanencia. A pesar de que las ramas y hojas presentan pequeñas aportaciones al *stock* de carbono, son importantes componentes para el manejo sostenible, por ejemplo, la evaluación de la sostenibilidad nutricional de las plantaciones, manejo de restos y acumulación de cargas de combustible para incendios, extracción residuos para bioenergía, entre otros.

Los modelos elegidos, además de su sencillez y practicidad por usar solo el diámetro con variable independiente, presentan muy buena bondad de ajuste y de precisión, lo cual los convierte en una herramienta muy confiable para medir la capacidad de almacenamiento de una plantación forestal, siempre que se utilicen bajo condiciones similares a las de este estudio.

6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y





claramente en la sección de agradecimientos, y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

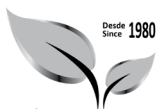
7. Agradecimientos

Este proyecto tuvo el aporte financiero de la Universidad Nacional, Costa Rica, por medio del Fondo de Investigación para el Desarrollo Académico (FIDA) y por el apoyo de los propietarios de las plantaciones, quienes facilitaron y permitieron la recolección de información de campo. Finalmente, se agradece a la revista y a las personas dictaminadoras externas por las observaciones realizadas a la versión final del escrito.

8. Referencias

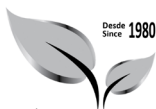
- Blujdea, V. N. B., Pilli, R., Dutca, I., Ciuvat, L. y Abrudan, I. V. (2012). Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. *For. Ecol. Manag.*, 264, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.042>
- Cabrera, C. (2003). Plantaciones forestales: oportunidades para el desarrollo sostenible. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Guatemala. Serie de documentos técnicos No. 06.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Vieilledent, G. (2014). Improved pantropical allometric models to estimate the above ground biomass of tropical forests. *Global Change Biology*, 20, 3177-319. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Costa Rica. (2014). *Tercera comunicación nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. San José, Costa Rica: MINAE, IMN, GEF, PNUD. 112 p. ISBN: 978-9977-50-116-1. <http://www.cac.int/sites/default/files/crinc3.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). *El estado de los bosques del mundo: las vías forestales hacia el desarrollo sostenible*. 132 p. <http://www.fao.org/documents/card/es/c/I9535ES/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016). *El estado de los bosques del mundo; los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades*. 35 p. <http://www.fao.org/3/a-i5850s.pdf>
- Fonseca, W., Alice, F., & 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., Ávila, C.; Rojas, M. y Murillo, R. (2020). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. F., en prensa.





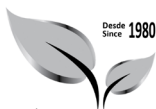
- Husch, B. (1963). *Forest mensuration and statistics*. Ronal press, New York.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). (2014). *Clima en Costa Rica: clima de Costa Rica y variabilidad climática* (en línea). San José, C. R. Consultado 2 mar., 2014. <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2018). Encuesta Nacional Agropecuaria 2018: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal. San José, Costa Rica. 81 p. <http://inec.cr/multimedia/encuesta-nacional-agropecuaria-2017-resultados-generales-de-la-actividad-agricola-y>
- Jiménez, L. (2016). El cultivo de la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en el trópico. ISBN: 978-9978-301-86-9. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE www.espe.edu.ec Sangolquí, Ecuador. 124 p. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11687>
- Jiménez, L. D., Valverde, J. C. y Arias, A. (2018). Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb., procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. *Revista Forestal Kurú*, 15 (Supl. 01), 53-60. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3775>
- 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>
- Kumar, A. (2007). Growth performance and variability in different clones of *Gmelina arborea* (Roxb.). *Silvae Genetica*, (56), 32-36. <https://doi.org/10.1515/sg-2007-0005>
- Lin, K., Lyu, M., Jiang, M., Chen, Y., Li, Y., Chen, G., Xie, J. and Yang, Y. (2017). Improved allometric equations for estimating biomass of the three *Castanopsis carlesii* H. forest types in subtropical China. *New Forests*, 48, 115-135. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9559-z>
- Melo, O. (2015). Modelación del crecimiento, acumulación de biomasa y captura de carbono en árboles de *Gmelina arborea* Roxb., asociados a sistemas agroforestales y plantaciones homogéneas en Colombia. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/50068/1/5937625.2015.pdf>
- Mensah, S., Kakaï, R. G., Seifert, T. 2016. Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: The effects of tree size and specific functional traits. *Ann. For. Res.*, 59, 1-12. <https://doi.org/10.15287/afr.2016.458>
- MINAE. (2018). Plan de descarbonización: descarbonicemos la economía. Compromiso país 218-2050. San José, Costa Rica. 9 p. <https://minae.go.cr/images/pdf/Plan-de-Descarbonizacion-1.pdf>





- Muñoz, F. y Berrocal, A. (2005). Secado experimental de *Gmelina arborea* Roxb., proveniente de la Zona Atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Kurú*, 2(4),1-15. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/550>
- Murillo, O., Wright, J., Monteuis, O. y Montenegro, F. (2013). Capítulo 6: *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. En: De Camino, R.; Morales, J. P. (eds). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Boletín Técnico 397. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 86-111 p.
- Onyekwelu, J. (2004). Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 26, 39-46. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00100-4)
- Quirós, S. (2015). Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxb., ex Sm., en Costa Rica (tesis de pregrado, Ingeniería Forestal). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6659/Modelos_volumen_comercial_perfil_fuste_crecimiento_plantaciones_clonales%20_gmelina_arborea.pdf?sequence=1
- Rodríguez, M., Arias, D., Valverde, J. C. y Camacho, D. (2018). Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb., y *Tectona grandis* L. F. en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Kurú*, 15 (Suppl. 01),61-68. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3723>
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., Arguedas, M. (2004). Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica. 190 p. <http://www.fonafifo.go.cr/media/1334/manual-para-productores-de-melina.pdf>
- Rojas, M. (2014). Carbono almacenado en plantaciones forestales de *Pinus caribaea*, *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus deglupta* en el Proyecto Hidroeléctrico Cachí. *Revista de Ciencias Ambientales*, 47(1), 5-15. <https://doi.org/10.15359/rca.47-1.1>
- Salas, C. (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque*, 23(2), 81-92. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- Salinas, Z. y Hernández, P. (Eds.). (2008). *Guía para el diseño de Proyectos MDL forestales y de bioenergía*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie Técnica, Manual Técnico/CATIE, n.º 83.
- Schlegel, B. (2001). *Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia*. In Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001.





- Segura, M., y Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96. <http://hdl.handle.net/11554/6935>
- Sierra, A., del Valle, J. y Orrego, S. (2001). *Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia*. In Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001.
- Swamy, S., Kushwaha, S. and Puri, S. (2004). Tree growth, biomass, allometry and nutrient distribution in *Gmelina arborea* stands grown in red lateritic soils of Central India. *Biomass and Bioenergy*, 26, 305-317. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.007>
- Vargas, B., López, C., Corral, J., López, J., Aguirre, C. Álvarez, J. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico. *Forests*, 8, 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Walkley, A. and A. I. Black. (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. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wayne, M., Samuel, E., Oyamakin, E., Angela, R., Chukwu, U. (2017). A new nonlinear model applied to the height-DBH relationship. *Forest Ecology and Management*, 397, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.015>

