

Predicción de biomasa en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f y *G. arborea arborea* Roxb. en Costa Rica

Biomass prediction in clonal plantations of *Tectona grandis* L. f y *G. arborea arborea* Roxb. in Costa Rica

William Fonseca-González¹  • Rafael Murillo-Cruz¹  • Carlos Ávila-Arias¹  • Rodrigo Benavidez-Fallas² 
 • Víctor Arce-Ledezma³  • Randall Carmona-Solis⁴  • Gerardo Ulloa-Saborío⁴ 
 • Ana Gabriela Salazar-Ruiz²  • David Carvajal-Arroyo² 

Recibido: 29/10/2020

Aceptado: 25/10/2021

Abstract

Actually, climate change is listed as the main problem facing humanity, parallel to this, forest ecosystems are recognized as carbon sinks. The objective of this work was to develop predictive models of biomass per unit area (hectare) for *Tectona grandis* and *G. arborea arborea*, established in commercial plantations from clonal material. The biomass of each component of the tree (leaves, branches, root, stem) was calculated using allometric models developed for both species. The information to apply those models was obtained from databases on tree measurements in permanent sampling plots and for each permanent plot, the biomass, and the basal area were calculated and then extrapolated to a hectare. Later, aggregate models were developed for the biomass per hectare of leaves, branches, roots, stems, for woody biomass and total biomass. All the models showed an adjustment (R^2) greater than 85 %, with RCME and EMA values less than 0.23 and errors or estimation biases less than 2.5 %. The chosen models are characterized by their robustness, precision, and practicality of use, making them a very useful tool for predicting biomass.

Keywords: Carbon, melina, teak, models, tree components.

1. Instituto de Investigación y Servicios Forestales-Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. wfonseca@una.cr; murillorafael5454@yahoo.com; carlos.avila.arias@una.ac.cr
2. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. rodrigo.benavides.fallas@gmail.com; gaby.salazarruiz@gmail.com; davidcarpio.daca@gmail.com
3. Novel Teak, Costa Rica. victor.arce@novelteak.com
4. Departamento de Investigación. Ethical Forestry EFCR S.A, Costa Rica. randall.carmona@ethicalforestry.com; gerardo.ulloa@ethicalforestry.com

Resumen

El cambio climático es catalogado como el principal problema que enfrenta la humanidad, paralelo a ello se les reconoce a los ecosistemas forestales la función como sumidero de carbono. El objetivo del trabajo fue desarrollar modelos predictivos de biomasa por unidad de área (hectárea) para *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, establecidas en plantaciones comerciales a partir de material clonal. La biomasa para cada componente del árbol (hojas, ramas, raíz, fuste) se calculó mediante modelos alométricos desarrollados para ambas especies en estudios anteriores. La información para aplicar dichos modelos se obtuvo de bases de datos sobre mediciones de árboles en parcelas permanentes de muestreo y para cada parcela permanente se calculó la biomasa y el área basal, que luego fueron extrapolados a hectárea. Posteriormente se desarrollaron modelos agregados para la biomasa por hectárea de hojas, ramas, raíces, fuste, para la biomasa leñosa y biomasa total. Todos los modelos mostraron un ajuste (R^2) superior al 85 %, con cifras de RCME y EMA inferiores 0,23 y con errores o sesgos de estimación inferior a 2,5 %. Los modelos elegidos se caracterizan por su robustez, precisión y practicidad para su uso, convirtiéndolos en una herramienta muy útil para la predicción de la biomasa..

Palabras clave: Carbono, melina, teca, modelos, componentes del árbol.

Introducción

El clima a escala mundial ha cambiado desde siempre de forma natural [1]; sin embargo, el deterioro de los reservorios naturales de carbono, principalmente por el uso de combustibles fósiles y la deforestación, han ocasionado el incremento de la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera [2]. Producto de lo anterior han aumentado los efectos del cambio climático, fenómeno que está alterando el comportamiento de los distintos ecosistemas a nivel global [3], lo que para muchos científicos es el principal problema que enfrenta la sociedad actual [4]-[5]. Se estima que de no existir un cambio positivo en las actividades humanas que provocan el aumento de uno de los GEI, la temperatura podría incrementarse en promedio entre 1,8 °C y 4 °C para el 2100 [6].

La respuesta de los países para enfrentar este fenómeno ha sido diversa; no obstante, se reconoce a nivel mundial, los esfuerzos de Costa Rica en el afán de colaborar en la búsqueda de soluciones, entre ellas, la política de carbono neutralidad fundamentada en la reducción de emisiones y en la compensación por el aumento en

los reservorios a través actividades forestales [1]. Al respecto, la forestación y reforestación son reconocidas por el Protocolo de Kioto, como una de las medidas más efectivas para aminorar el cambio climático [7].

Se estima que las plantaciones en el mundo tienen un potencial de secuestro de carbono equivalente al 52 % de las emisiones de carbono proyectadas para el 2100 en los sectores energía e industria [8]. A pesar de ello, James, Phua, Awang y Mokhtar [9] apuntan diferencias en la acumulación de biomasa, carbono, en los diferentes arreglos para la producción forestal; e inclusive a nivel de distintas condiciones edáficas [10]. Se debe realizar investigación que abarque desde los sistemas más complejos hasta los más simples en términos de biodiversidad, como son las plantaciones puras de especies como *Tectona grandis* y *G. arborea*, objeto del presente estudio.

Teca (*Tectona grandis*) y melina (*G. arborea*), son especies exóticas en Costa Rica, de rápido crecimiento y las de mayor superficie plantada en Costa Rica, ambas suman 59 215 ha [11] (INEC, 2019). La madera de *T. grandis* es de excelentes características y se utiliza en la fabricación de productos de alto valor en el mercado mundial [12]. Por su parte, la *G. arborea* registra una madera de menor precio y tiene muchos usos. En Costa Rica se utiliza para construcción en general y, en un alto porcentaje, para la fabricación de tarimas para el embalaje, principalmente de productos agrícolas [13]-[14]. Ambas especies, por el área plantada y por su velocidad de crecimiento, pueden aportar de manera significativa al objetivo nacional de carbono neutralidad. Por lo antes expuesto y la importancia que tiene el cálculo de secuestro de carbono se desarrolló la investigación con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos que faciliten calcular la producción de biomasa por hectárea para *T. grandis* y *G. arborea*, mediante los cuales se genere información que permita establecer indicadores nacionales sobre el potencial que tienen ambas especies para mitigar el cambio climático.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprendió la zona norte, pacífico norte y sur de Costa Rica, en sitios con plantaciones de *T. grandis* y *G. arborea* establecidas con material clonal. En el Cuadro 1 y la Figura 1 se muestra la localización de los sitios de muestreo. En la zona norte se trabajó en los cantones Guatuso, 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 se trabajó en los cantones Nicoya, Nandayure, Santa Cruz y La Cruz (Guanacaste), además

Cuadro 1. Localización de los puntos de muestreo para *G. arborea* y *T. grandis*.

Table 1. Location of sampling points for *G. arborea* and *T. grandis*.

Especie	Provincia	Cantón	Distrito	Finca	Latitud	Longitud
<i>G. arborea</i>	Alajuela	Guatuso	San Rafael	G	10,69171	-84,93362
			Monterrey	SA	10,57733	-84,56911
		San Carlos	Pocosol	SC	10,81627	-84,52357
			Cutris	SC	10,63279	-84,39598
	Puntarenas	Upala	Aguas Claras	SU	10,93918	-85,25366
		Golfito	Puerto Jiménez	Barroso	8,66100	-83,47000
		Lepanto	Cóbano	C	9,76700	-85,12100
		Golfito	Puerto Jiménez	Marlene	8,61200	-83,43800
			Puerto Jiménez	Matamoros	8,57800	-83,39600
		<i>T. grandis</i>	Guanacaste	Nicoya	Nicoya	GT
Nosara	GZ				9,91475	-85,61099
Nicoya	LQ				10,07958	-85,54002
Nandayure	Bejuco			ML	9,84175	-85,24976
La Cruz	La Cruz			PB	11,19422	-85,61478
Santa Cruz	Veintisiete de Abril			RT	10,15918	-85,69753
La Cruz	La Garita			SC	11,10462	-85,45480
Hojancha	Puerto Carrillo			SM	9,97203	-85,45194
Puntarenas	Golfito		Puerto Jiménez	Barroso	8,76300	-83,47100
			Puerto Jiménez	Biólogo	8,66700	-83,44900
	Osa		Piedras Blancas	Salamá	8,80900	-83,28900
	Puntarenas		Paquera	TR	9,77577	-85,16014

de Lepanto y Puntarenas (Puntarenas), la precipitación promedio es de 1 888 mm al año y la temperatura media de 27 °C. En la zona sur, en los distritos Puerto Jiménez (Golfito) y Piedras Blancas (Osa), los que registran una precipitación promedio de 3 650 mm al año y la temperatura media 26 °C [15].

Muestreo

En las plantaciones evaluadas, de ambas especies, se establecieron parcelas permanentes de muestreo de 500 m² que fueron remedidas todos los años, el número de mediciones en cada parcela varió según la edad de la plantación, en *T. grandis* de 1 a 17 años, en *G. arborea* de 1 a 9 años. También se utilizó las series de mediciones de ensayos clonales de *G. arborea* desde 1 hasta 5 años.

En cada unidad de muestreo se registraron diferentes variables dasométricas como diámetro a la altura de pecho (Dap) medido con cinta diamétrica y altura total medida con clinómetro suunto; además de la calidad mediante la forma de las trozas, Para efectos de este

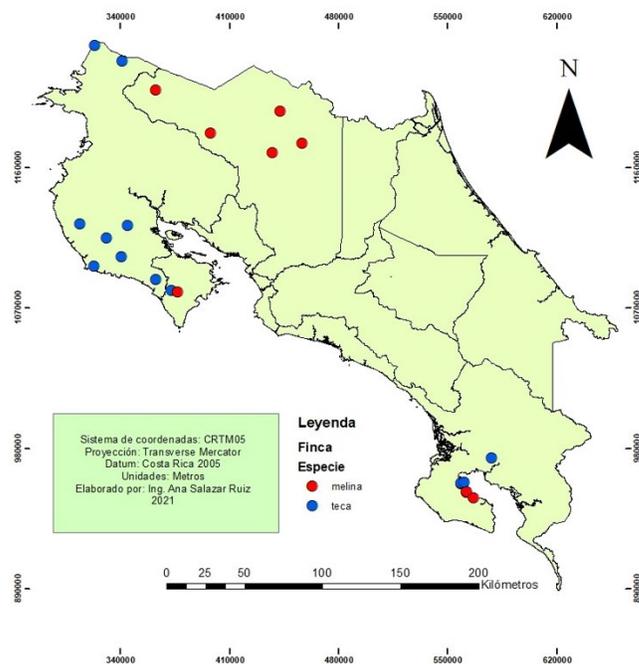


Figura 1. Localización de los puntos de muestreo para *G. arborea* y *Tectona grandis*.

Figure 1. Location of sampling points for *G. arborea* and teak.

Cuadro 2. Cantidad de parcelas según las clases de área basal en las plantaciones de *T. grandis* y *G. arborea*.**Table 2.** Number of parcels according to the basal area classes in *T. grandis* and *G. arborea* plantations.

Clase área basal (G= m ² ha ⁻¹)	Número de observaciones	
	<i>T. grandis</i>	<i>G. arborea</i>
0 – 3	24	2
4 – 6	60	76
7 – 9	268	152
10 – 12	556	84
13 - 15	532	59
16 - 18	324	118
19 - 21	135	120
22 - 24	84	51
25 - 27	65	4
28 - 30	40	2
31 - 33	29	2
34 - 36	14	2
37 - 39	3	0
Total	2134	671

trabajo solo se consideró el Dap. Con la información de cada unidad de muestreo se confeccionó una base de datos, y una vez revisada para identificar inconsistencias y eliminar los datos que no pertenecen a esa población, se calculó el área basal (m²) por árbol y por hectárea. El tamaño de la muestra en *T. grandis* fue de 2 134 observaciones y de 671 para *G. arborea* (Cuadro 2), aseguró la representatividad de las distintas calidades de sitio para el cultivo de ambas especies en Costa Rica. La biomasa por hectárea se calculó al aplicar, a cada individuo de la unidad de muestreo, los modelos alométricos desarrollados por [16] y [17], y luego extrapolada a hectárea.

Ajuste y selección de modelos

Se realizó análisis de regresión simple mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphcs Centurion XVI. Para el conjunto de datos se ensayaron aproximadamente 10 modelos para predecir la biomasa por hectárea (Mg ha⁻¹) del componente hojas (B. hojas), ramas (B. ramas), raíz (B. raíz), fuste (B. fuste), leñoso (ramas+fuste+raíz) (B. leñoso) y árbol completo (B. total). En todos los casos se utilizó como variable independiente el área basal por hectárea (G en m² ha⁻¹). La comprobación de los supuestos del análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas) se realizó por el método gráfico [18]. Además, se probaron

transformaciones de las variables para mejorar el ajuste y corregir la heterocedasticidad [18]- [19].

La selección de la ecuación de mejor ajuste se realizó tomando en cuenta: a) la variabilidad del modelo explicado por el coeficiente de determinación (R²) [20], b) la precisión de las estimaciones en función a la raíz del cuadrado medio del error (RCME) [20], [21], [22]; y c) el comportamiento de la ecuación determinado por el error absoluto medio (EMA) [22].

Para la precisión y validación de los modelos se tomó en consideración: a) el método gráfico de dispersión entre los observados vs predichos [20], y b) el error absoluto promedio porcentual o sesgo: EAPP=1/n(Σ(P-O)/O 100) [20]-[22]-[23]-[24], donde: P, la biomasa predicha o simulada; O, la biomasa observada y n, el total de datos.

Adicionalmente, se calculó el estadístico Durbin Watson (DW) que mide la independencia de los datos [83], el Índice de Furnival (IF) para comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente es transformada [26], el criterio de información de Akaike (AIC) como medida relativa de la calidad del modelo [23] y el error del modelo o sesgo (E%) [19]- [23]- [24], error cuadrático medio (ECM) y la diferencia agregada (DA).

Todos los estadígrafos calculados fueron ranqueados según su magnitud relativa tomando como referencia la metodología expuesta por Segura y Andrade [26], Salas [27] y Bueno et al. [19].

Resultados

En los cuadros 3 y 4, además de las figuras 2 y 3 muestran las estimaciones de los parámetros y las estadísticas de bondad de ajuste para el modelo elegido, por componente de la biomasa y la biomasa total. Las estimaciones de los parámetros fueron significativas ($\alpha = 0,05$). Todos los modelos presentaron un ajuste satisfactorio y similar (R² entre 95,3 % y 95,8 %) en *T. grandis* y de 85,3 % a 97,1 % en *G. arborea*, con errores o sesgos de estimación inferior a 2,5 %, condición que se observa en la figura 2b, 3b al ubicarse la nube de puntos muy cercana a la línea de tendencia central cumpliéndose con el supuesto de normalidad.

Los estadígrafos de predicción (RCME y EMA) menor a 0,11 para *T. grandis* e inferior a 0,23 en *G. arborea*, cifras también son aceptables, significan que la biomasa total calculada tiene una diferencia con relación a observada de 0,11 Mg ha⁻¹ en *T. grandis* y de 0,23 Mg ha⁻¹ en *G. arborea*. Los otros parámetros estadísticos también presentan valores bajos (muy aceptables) en ambas especies (Cuadro 3 y 4).

Los resultados indicaron una relación positiva fuerte entre el área basal y la biomasa, que se confirma con el coeficiente de determinación (R²); para todos los

Cuadro 3. Modelos para estimar biomasa (Mg ha⁻¹) en *T. grandis*.**Table 3.** Models selected to estimate biomass (Mg ha⁻¹) in *T. grandis*.

Modelo	R ²	RCME	EMA	DW	ECM	DA	IF	PRESS	E%	AIC
Btotal = exp(1,98117 + 1,13225 ln(G))	95,3	0,114	0,087	0,689	14,7	0,5	0,4	460742,4	0,7	2,7
Bleñoso = exp(1,92602 + 1,12705 ln(G))	95,8	0,109	0,083	0,707	13,1	0,4	0,3	367834,7	0,6	2,6
Bfuste = exp(1,38463 + 1,1281 ln(G))	95,6	0,109	0,084	0,704	7,7	0,2	0,3	126627,6	0,6	2,0
Bramas = exp(0,0477079 + 1,13233 ln(G))	95,4	0,112	0,086	0,692	2,1	0,1	0,2	9446,3	0,7	0,7
Braíz = exp(0,41762 + 1,12884 ln(G))	95,6	0,110	0,084	0,701	2,9	0,1	0,2	18564,4	0,6	1,1
Bhojas = exp(-0,96452 + 1,12568 ln(G))	95,7	0,107	0,083	0,715	0,7	0,0	0,2	1107,1	0,6	-0,4

exp: exponente, ln: logaritmo natural, DW (P=0,0000).

Cuadro 4. Modelos elegidos para estimar biomasa (Mg ha⁻¹) en *G. arborea*.**Table 4.** Models selected to estimate biomass (Mg ha⁻¹) in *G. arborea*.

Modelo	R ²	RCME	EMA	DW	ECM	DA	IF	PRESS	E%	AIC
Btotal = exp(1,50918 + 0,632393 G ^{0,5})	85,3	0,226	0,175	0,309	5,0	1,4	0,23	164974,6	2,5	1,61
Bleñosa = exp(1,34187 + 0,75798 G ^{0,5})	91,2	0,204	0,148	0,726	15,4	0,8	11,5	156188,8	1,9	2,74
Bfuste = exp(1,39694 + 0,649305 G ^{0,5})	90,0	0,185	0,135	0,446	11,1	1,2	7,5	83219,5	1,1	2,41
Bramas = exp(-0,700853 + 1,17534 ln(G))	97,1	0,105	0,076	0,326	0,9	0,0	0,9	506,7	0,5	-0,01
Braíz = 1/(-0,0259314 + 1,35374/G)	85,7	0,031	0,019	0,736	4,8	0,8	0,03	15183,3	-0,6	1,57
Bhojas = (-0,258174 + 0,599348 G ^{0,5}) ²	97,4	0,085	0,054	1,494	0,2	0,0	0,09	41,6	1,2	-1,60

exp: exponente, ln: logaritmo natural, DW (P=0,0000).

modelos seleccionados, el área basal explicó más 85 % de la variabilidad observada en la biomasa.

Discusión

Con el fin de evaluar la capacidad de los ecosistemas para mitigar el cambio climático, el esfuerzo en desarrollar modelos matemáticos (regresiones o ecuaciones) para predecir la biomasa del árbol o de sus componentes es abundante, y la literatura mundial sigue reportando con frecuencia nuevos estudios de esta naturaleza. También se ha demostrado que variables dasométricas del árbol como el diámetro y la altura, principalmente, son buenas predictoras de la biomasa o el carbono [28]. No obstante, son escasos los modelos para estimar o predecir la biomasa o el carbono por unidad de área (por hectárea), y específicamente para *T. grandis* y *G. arborea* no existen. Ejemplo de ello es el estudio desarrollado por James et al. [9], quienes debieron emplear modelos desarrollados en distintos países y condiciones, con lo que se incrementa el nivel de incertidumbre y veracidad del resultado final.

Este tipo de modelos de regresión, también llamados modelos agregados, tienen la ventaja de que permiten hacer el cálculo directo por hectárea, sin necesidad de extrapolaciones, como en el caso de las ecuaciones a nivel de árbol. López, Estuardo y Alvarado [29] reportan que dicho procedimiento en algunos casos llevaría a cometer ciertos errores, sino se tiene experiencia y cuidado.

Los modelos elegidos son robustos, es decir, tienen buenos ajustes (R² > 85%), con errores o sesgos de predicción inferior a 2,5% y parámetros de predicción muy bajos (RCME y EMA), menor a 0,11 para *T. grandis* y a 0,23 en *G. arborea*, valores que coinciden, en forma general con lo reportado en la literatura para otras especies. En *Alnus acuaminta* HBK se logró un ajuste de 99,3 % para la biomasa arbórea y de 89,6 % para la biomasa total, en ambos casos se reporta un RCME inferior a 0,23, ECM menor a 11,8 y el error de estimación menor 1,2 % [30]. Para *Hieronyma alchorneoides* y *Vochysia guatemalensis*, especies que son nativas pero se han establecido en plantaciones, Fonseca et al. [31] modelaron la biomasa arbórea y total en función del área basal con R² mayor a 94 % y un RCME entre 0,35 y 0,66. Cifras inferiores reportaron [32], las que representan

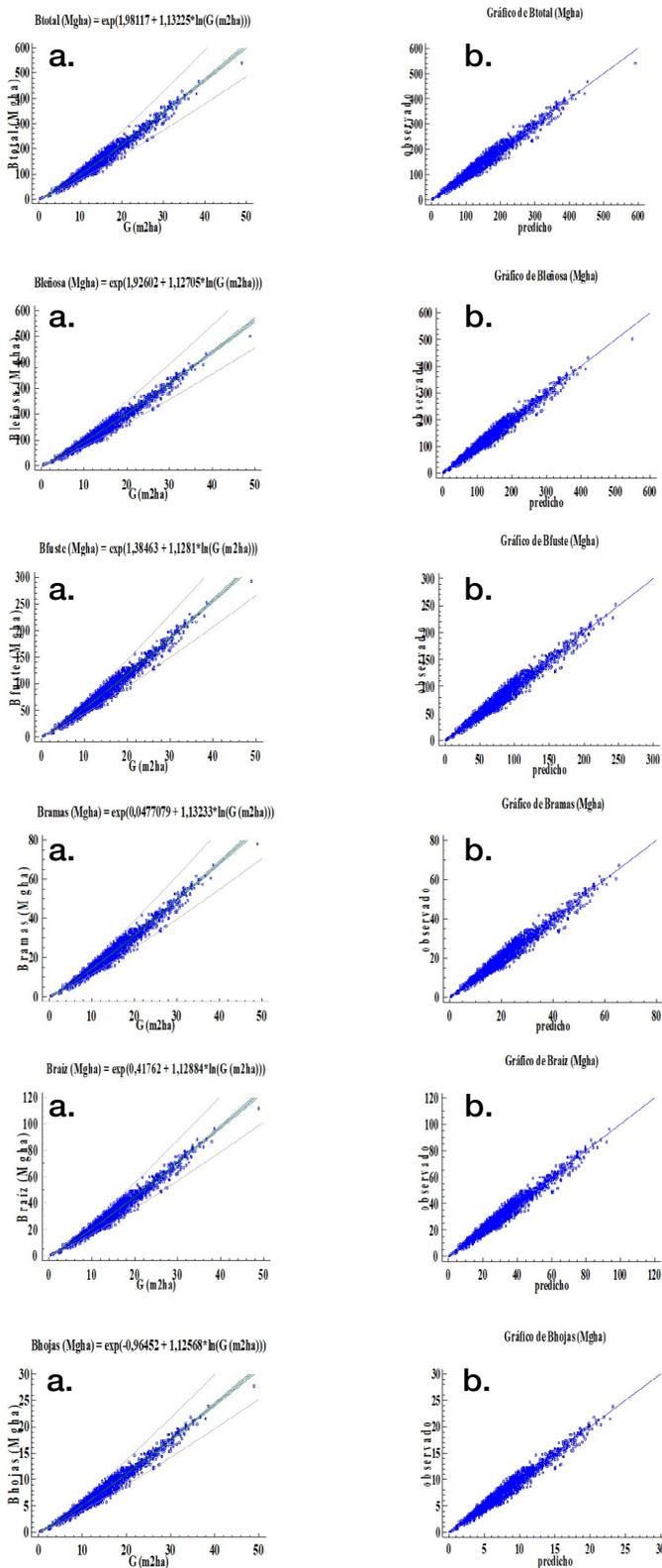


Figura 2. Modelos para estimar biomasa por componente y biomasa total (Mg ha⁻¹) en *T. grandis*: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos vs observados.

Figure 2. Models to estimate biomass by component and total biomass (Mg ha⁻¹) in *T. grandis*: a) graph for the adjusted model, b) graph of predicted vs observed values.

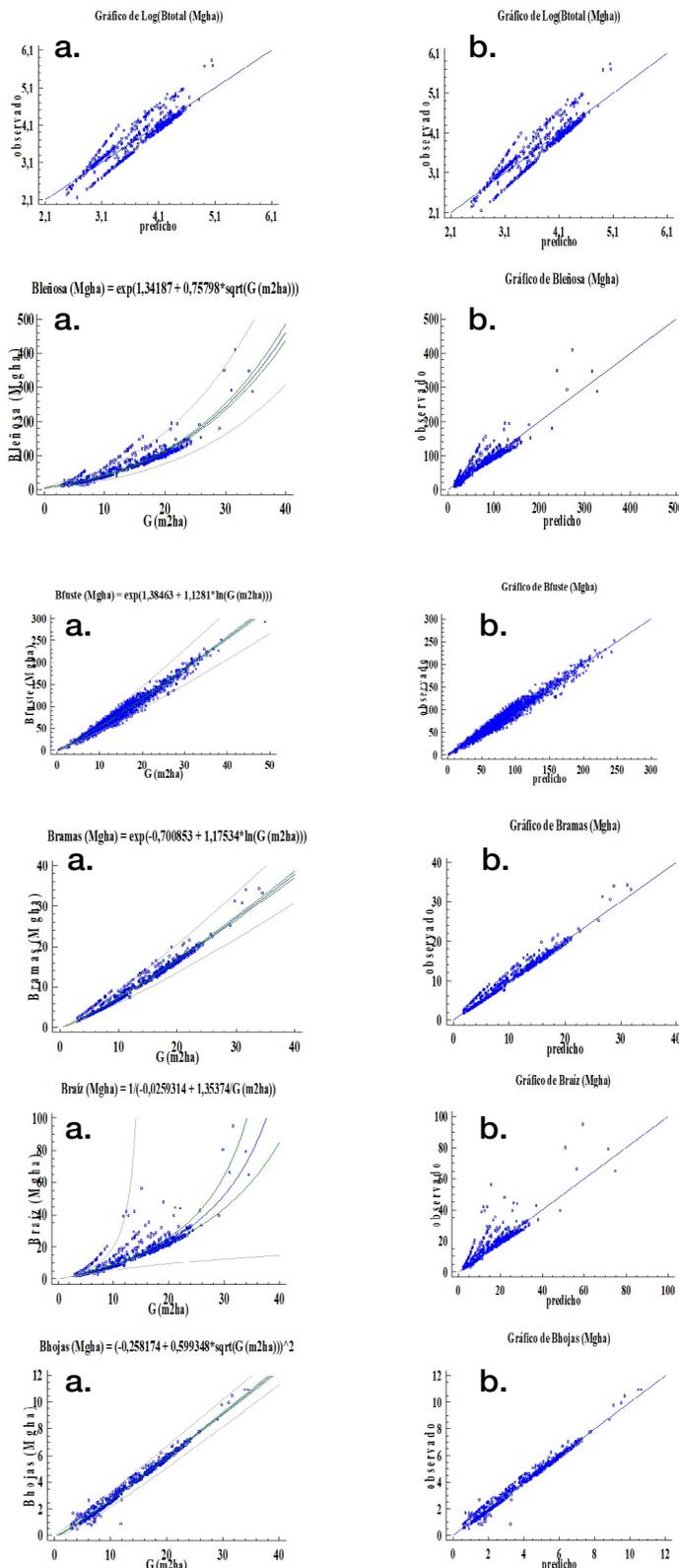


Figura 3. Modelos para estimar biomasa por componente y biomasa total (Mg ha⁻¹) en *G. arborea*: a) gráfico para el modelo ajustado, b) gráfico de valores predichos vs observados.

Figure 3. Models to estimate biomass by component and total biomass (Mg ha⁻¹) in *G. arborea*: a) graph for the adjusted model, b) graph of predicted vs observed values.

menor robustez y precisión de los modelos, con R^2 de 79,6 % a 81,5 %, RCME entre 10 y 23,0, EMA de 8,15 a 19,5 y E% entre 4 % y 10 % para biomasa y carbono aéreo y total en bambúes.

Los modelos de predicción de la biomasa o el carbono en función del área basal en bosque natural, también muestran ajustes tan buenos como los logrados en el presente estudio. Para un grupo de especies de bosque secundario [33], registraron un R^2 de 95,7 %; 96,0 % y 97,8 % con RCME menor a 0,31 para la biomasa total, carbono total y carbono en la biomasa arbórea, respectivamente. Para bosques naturales caducifolios, [34] lograron ajustes ($R^2 > 0,96$ %), con cifras de RCME 0,08 y 0,54, EMA entre 0,07 y 0,43 y sesgos menores a 0,6 %.

Llama la atención los resultados obtenidos en el presente estudio por varias razones: en primer lugar, sorprende la robustez de los modelos para *T. grandis* con ajustes (R^2) tan similares para todos los componentes, y en segundo lugar, el excelente ajuste para el componente hojas y ramas en ambas especies, porque el reporte de la literatura indica que, por lo general, son más difíciles de modelarlos [34], [35], [36], [37] al registrar R^2 más bajos y los demás estadísticos con cifras más altas que indican menor precisión. Los modelos elegidos para ambas especies (Cuadro 3 y Cuadro 4), complementados con la fracción de carbono determinada para la especie, a saber: en *T. grandis*, 0,41; 0,45; 0,46 y 0,46 para el componente hojas, ramas, raíz y fuste, respectivamente, y para *G. arborea*, 0,39; 0,46; 0,48 y 0,45 [38]- [39], permiten determinar la capacidad de mitigación del cambio climático del sistema productivo en un momento de su vida.

Conclusiones

Los modelos elegidos, además de su sencillez y practicidad por usar solo el área basal como variable independiente, presentan muy buena robustez y precisión, y representan un avance importante para la cuantificación confiable y el monitoreo de la biomasa o el carbono en una plantación forestal, lo cual los convierte en una herramienta muy útil siempre que se utilicen bajo condiciones similares.

Este tipo de estudios permite el establecimiento de indicadores nacionales de secuestro de carbono (al multiplicar la biomasa calculada por la fracción de carbono de la especie) y la no dependencia de modelos desarrollados en otras latitudes para evaluar la capacidad de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales, esto es fundamental para Costa Rica que se declaró la carbono neutralidad con el máximo nivel de precisión, la Tier 3 según el IPCC.

Agradecimientos

El proyecto “Evaluación del crecimiento de plantaciones clonadas de *T. grandis* y *G. arborea* y determinación de la rentabilidad de la producción de madera de ambas especies” se ejecutó gracias al aporte financiero de la Universidad Nacional de Costa Rica, a través 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.

Referencias

- [1] J. Herrera, J. F. Rojas, A. Quirós, C. Balma y D. Anchía, “Desarrollo de inventarios de emisiones de Gases Efecto Invernadero, una herramienta de apoyo en la agenda local de cambio climático: caso San José”, Revista Geográfica de América Central, vol. 1, no. 58, pp. 153-180, 2016.
- [2] D. Sánchez, “Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero del Plantel El Alto en Ochomogo, RECOPE”, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2012.
- [3] C. Jumbo, C. Arévalo y L. Ramírez, “Medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tanajillas-Limón Indanza, Ecuador”, La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, vol. 27, no.1, pp. 51-63, 2018.
- [4] G. Peters y E. Hertwich, “Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption”, Climatic Change, no. 86, pp. 51-66, 2008. doi. 10.1007/s10584-007-9280-1
- [5] C. Ludeña, C. de Miguel y A. Schuschny, “Cambio climático y mercados de carbono: repercusiones para los países en desarrollo”, Revista Cepal, vol. 1, no.116, pp. 61-85, 2015.
- [6] Z. Wang and C. Wang, “How carbon offsetting scheme impacts the duopoly output in production and abatement: analysis in the context of carbon cap-and-trade”, Journal of Clean Production, no.103, pp. 715-723, 2015.
- [7] A. Albrecht y S. T. Kandji, “Carbon sequestration in tropical agroforestry systems”, Agriculture Ecosystems & Environment, no. 99, pp. 15-27, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5)
- [8] Corporación Chilena de la Madera, “Plantaciones Forestales: Un Aporte Clave a Mitigación de Cambio Climático”, Santiago, Chile, 2015. Disponible en <https://www.corma.cl/wp-content/uploads/2018/10/plantaciones-forestales-un-aporte-clave-a-mitigacion-de-cambio-climatico.pdf>
- [9] D. James, M. Phua, N. Awang y M. Mokhtar, “Aboveground Carbon Stock Potential of Teak (*Tectona grandis*) under Different Land Use System in Balung Plantation, Tawau Sabah”, Transactions on Science and Technology, vol. 3, no. 1-2, pp. 168- 175, 2016.
- [10] B. Ruiz, “Valoración del carbono almacenado en una plantación forestal comercial de *Tectona grandis* (*Tectona grandis*) bajo tres condiciones edáficas en Nayarit,

- México”, Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara, México. 2016.
- [11] INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos)-Costa Rica. “Encuesta Nacional Agropecuaria 2019”. 2019. Disponible en <https://www.inec.cr/encuesta-nacional-agropecuaria>. Accesado el 10 de julio de 2021.
- [12] R. Keogh, “La *Tectona grandis* y su importancia económica a nivel mundial. In: Las plantaciones de *Tectona grandis* en América Latina: Mitos y realidades” Ed. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, 2013. Disponible en http://www.ibiologia.unam.mx/gela/Tectona_grandislibro.pdf.
- [13] F. Rojas, D. Arias, R. Moya, A. Meza, O. Murillo y M. Arguedas, “Manual para productores de *G. arborea* en Costa Rica”. San José, Costa Rica, 2004. Disponible en http://www.fonafifo.go.cr/media/1334/manual-para-productores-de-G_arborea.pdf
- [14] L. Jiménez, “El cultivo de la *G. arborea* Roxb. en el trópico”, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE”, Sangolquí, Ecuador, 2016. Disponible en <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11687>. ISBN: 978-9978-301-86-9
- [15] Gobierno de Costa Rica, “Tercera comunicación nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático”. San José, Costa Rica: MINAE, IMN, GEF, PNUD, 2014. ISBN: 978-9977-50-116-1. Disponible en <http://www.cac.int/sites/default/files/crinc3.pdf>
- [16] W. Fonseca, C. Ávila, R. Murillo y M. Rojas, “Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f”, Colombia Forestal, vol. 24, no. 1, pp. 31-44, 2021. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15961>
- [17] W. Fonseca, R. Murillo, C. Ávila, M. Rojas, R M. Spinola, “Modelos de biomasa y carbono para árboles de *G. arborea* en plantaciones clonales”. Revista de Ciencias Ambientales, vol. 55, no. 1, pp. 143-159. 2021. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/14822/20714>
- [18] N. Picard, L. Saint-André y M. Henry, “Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción”. Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Developpement, Rome, Montpellier, 2012. Disponible en <http://www.fao.org/3/i3058s/i3058s.pdf>
- [19] S. W. Bueno, E. Garcia y L. R. Caraballo, “Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of *Pinus occidentalis* trees”, Madera y Bosques, vol. 25, no. 3, pp. 1- 16, 2019.<http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v25n3/2448-7597-mb-25-03-e2531868.pdf>
- [20] R. Puc, G. Ángeles, J. R. Valdez, V. J. Reyes, J. M. Dupuy, L. Schneider, P. Pérez y X. García, “Species-specific biomass equations for small-size tree species in secondary tropical forests”, Trop Subtrop Agroecosystems, vol. 22, no. 3, pp. 735- 754, 2019. <https://www.researchgate.net/publication/337682547>
- [21] M. Aquino, A. Velázquez, J. F. Castellanos, D. los Santos y J. D. Etchevers, “Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales”, Agrociencia, vol. 49, no. 3, pp. 299- 314, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/317440442>
- [22] D. I. Forrester, H. H. Tachauer, P. Annighoefer, I. Barbeito, H. Pretzsch, R. Ruiz, H. Stark, G. Vacchiano, T. Zlatanov y T. Chakraborty, “Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate”, For Ecol Manage, no. 396, pp. 160- 175, 2017.<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>.
- [23] J. Chave, M. Réjou, A. Búrquez, E. Chidumayo, M. Colgan, W. Delitti, A. Duque, T. Eid, P. Fearnside, R. Goodman, M. Henry, A. Martínez, W. Mugasha, H. Muller, M. Mencuccini, B. Nelson, A. Ngomanda, E. Nogueira, E. Ortiz, R. Pélissier, P. Ploton, C. Ryan, J. G. Saldarriaga y G. Vieilledent, “Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees”, Global Change Biology, vol. 20, no. 10, pp. 3177- 3190, 2014.<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- [24] B. G. Cortés, G. Ángeles, H. M. Santos y H. Ramírez, “Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México”, Madera y Bosques, vol. 25, no. 2, pp. 1- 17, 2019.<http://doi:10.21829/myb.2019.2521799>.
- [25] J. A. Ramos, J. J. García, J. Hernández, X. García, J. C. Velarde, H. Muñoz y G. Guadalupe. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 5(23):93-109. <http://doi.org/10.29298/rmcf.v5i23.344>
- [26] M. Segura y H. Andrade, “¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?”, Agroforestería de las Américas, no. 46, pp. 89-96, 2008.
- [27] C. Salas, “Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Lau-rel-Lingue”, Bosque, vol. 23, no. 2, pp. 81-92, 2002. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- [28] F. Equakun y G. Abraham, “Forecasting carbon sequestered in leaf litter of *Tectona grandis* species using tree growth variables”, World Scientific News, pp. 197-212. 2018.
- [29] H. López, E. Estuardo y A. Alvarado, “Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de *Tectona grandis* en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala”, Agronomía Costarricense, vol. 42, no. 1, pp.137-153, 2018.
- [30] W. Fonseca, J. Herrera y F. Alice, “Desarrollo de métricas sobre emisiones y almacenamiento de carbono en Costa Rica”, Ciencias Ambientales, no.47, pp. 16-31, 2014. ISSN: 1409-2158 / 2014.
- [31] W. Fonseca, F. Alice, J.M. Rey-Benayas, “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, vol. 43, no.2, pp. 197-211, 2011. DOI 10.1007/s11056-011-9273-9.
- [32] W. Fonseca y M. Rojas, “Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica”, Ambiente y Desarrollo, vol. 20, no. 38, pp. 85-98, enero-junio, 2016. ISSN: 0121-7607.

- [33] W. Fonseca, J. M. Rey- Benayas, F. Alice, "Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica", *Forest Ecology and Management*, vol. 262, pp.1400-1408, 2011.
- [34] W. Fonseca, R. Villalobos y M. Rojas, "Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono", *Revista de Ciencias Ambientales (Tropical Journal of Environmental Sciences)*, vol. 53, no. 2, pp. 111-131, 2019. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.6>
- [35] F. Muñoz, R. Rubilar, M. Espinosa, J. Cancino, J. Toro y M. Herrera, "The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden", *Forest Ecology and Management*, vol. 255, no. 3-4, pp. 365-73, 2008. DOI:10.1016/j.foreco.2007.09.063
- [36] B. Vargas, C. López, J. Corral, J. López, C. Aguirre and J. Álvarez, "Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico", *Forests*, vol. 8, no. 8, pp. 269, julio 2017. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- [37] M. F. Flores, D. J. Vega, J.J. Corral, J. G. Álvarez, A. D. Ruiz, C. A. López y A. Carillo, "Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 9, no. 46, pp.158-185, 2018. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>.
- [38] W. Fonseca, C. Ávila, R. Murillo y M. Rojas, M. "Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f". *Revista Colombia Forestal*, , vol. 24, no. 1, pp. 31-44, 2021. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15961>
- [39] W. Fonseca, R. Murillo, C. Ávila y M. Rojas, "Modelos de biomasa y carbono para árboles de *G. arborea* en plantaciones clonales". Sometido a la *Revista de Ciencias Ambientales*, 2020. En prensa.