

Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en una plantación de *Tectona grandis* L. F. en Yucatán

Allometric models to estimate aboveground biomass in a *Tectona grandis* L. F. plantation in Yucatán

Pablo Marroquín-Morales^{1*},
Javier Jiménez-Pérez²,
José Israel Yerena-
Yamallel²,
Jorge Reyes-Reyes¹

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas. México. Entronque carreta costera y pueblo Huehuetán. CP. 30660. Huehuetán, Chiapas, México.

²Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Carretera Nacional #85 km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia:
marroquin_34@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 19 de diciembre
2022

Aceptado: 10 de mayo 2023

Como citar: Marroquín-Morales P, Jiménez-Pérez J, Yerena-Yamallel JI, Reyes-Reyes J (2023) Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en una plantación de *Tectona grandis* L. F. en Yucatán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(2): e3566. DOI: 10.19136/era.a10n2.3566

RESUMEN. Los modelos alométricos son de vital importancia ya que permiten estimar la biomasa aérea en cada uno de sus componentes (hojas, ramas, fuste y total) del árbol. El objetivo del estudio fue ajustar modelos alométricos para estimar biomasa aérea por componentes en árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. en Tizimín, Yucatán. La biomasa aérea se estimó mediante el método directo, se derribó en campo un total de 32 individuos, cada árbol se separó por componente; hojas, ramas y fuste y se determinó el peso verde, se extrajeron submuestras de los componentes para determinar la relación peso seco-peso verde. Para obtener la biomasa se multiplicó el peso verde total de cada componente por su relación correspondiente. Para cada componente se ajustaron ecuaciones lineales y no lineales, mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. El modelo no lineal (potencial) mostró mejor ajuste, presentando el componente fuste y total registraron un R^2 de 0.96 en *T. grandis* L. f. La proporción de biomasa en cada uno de sus componentes fue diferente, siendo el fuste el de mayor porcentaje con un 48%, seguido de ramas con 35 y 17% en hojas.

Palabras clave: Ajuste, componentes de biomasa, diámetro, fuste, teca.

ABSTRACT. Allometric models are of vital importance since they allow estimating the aerial biomass in each of its components (leaves, branches, stem and total) of the tree. The objective of the study was to adjust allometric models to estimate aerial biomass by components in individual trees of *Tectona grandis* L. f. in Tizimin, Yucatan. Aerial biomass was estimated using the direct method, a total of 32 individuals were shot down in the field, each tree was separated by component; leaves, branches and stem and the green weight was determined, subsamples of the components were extracted to determine the dry weight-green weight relationship. To obtain the biomass, the total green weight of each component was multiplied by its corresponding ratio. Linear and non-linear equations were adjusted for each component, using the method of ordinary least squares. The non-linear (potential) model showed a better fit, presenting the stem and total component they registered an R^2 of 0.96 in *T. grandis* L. f. The proportion of biomass in each of its components was different, being the stem the one with the highest percentage with 48%, followed by branches with 35 and 17% leaves.

Key words: Adjustment, biomass components, diameter, stem, teak.

INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal es un parámetro fundamental, que indica el peso seco de la materia orgánica que existe en un árbol o ecosistema, la cual permite estimar el carbono y el bióxido de carbono secuestrado en los árboles (Schlegel *et al.* 2000). La biomasa se localiza de manera aérea o subterránea, la biomasa subterránea corresponde a las raíces y la aérea contempla las hojas, ramas y fuste (Murillo *et al.* 2015). La biomasa puede ser estimada mediante métodos directos o indirectos. En los métodos directos, se requiere derribar o extraer el árbol, para determinar su peso verde en campo, y después extraer submuestras por componente para obtener la relación peso seco-peso verde, para al final obtener biomasa por individuo (Montoya *et al.* 2018). Mientras que los métodos indirectos se fundamentan en el volumen y densidad básica para conocer la biomasa del fuste, y con la aplicación de un factor de expansión, estimar la biomasa aérea total (Fonseca 2017). Los métodos indirectos también abarcan los modelos alométricos, dichos modelos son establecidos por regresiones lineales y no lineales, a través de la relación de una variable dependiente (biomasa) con variables independientes como el diámetro y la altura total (Cuenca *et al.* 2014).

La teca, en los últimos años, ha sido la especie más plantada a nivel mundial, aproximadamente tiene un aumento anual de 11% (FAO 2015). La proporción de biomasa que tiene la teca en cada componente, cambia conforme la edad, de tal manera que la proporción del fuste y ramas aumenta, mientras que, en el componente hojas la biomasa tiende a disminuir (Nirmal *et al.* 2009). Se sabe que la calidad de sitio afecta la proporción de biomasa en los diferentes componentes aéreos del árbol, pero el componente fuste es el que tiene mayor acumulación de biomasa que los componentes hojas y ramas (Murillo *et al.* 2015).

Las plantaciones de teca proporcionan servicios como captura de carbono, a través de la fotosíntesis, proceso que consiste en absorber el bióxido de carbono, liberando el oxígeno y almacenando el carbono en sus tejidos (Aguirre y Jiménez 2011).

El carbono que almacenan las plantaciones ayudan a mitigar los gases de efecto invernadero, sin embargo, para conocer el carbono o bióxido de carbono capturado en árboles de teca, es necesario conocer la dinámica de la biomasa (Nirala *et al.* 2018). La acumulación de biomasa en teca es afectada por el desarrollo fisiológico, el tipo de suelo, la precipitación e incluso en el manejo de la plantación debido a las podas y aclareos que se realizan (Picard *et al.* 2012), es por eso los modelos alométricos deben ser ajustados para cada región o lugares específicos a fin de tener una mejor estimación de biomasa en la especie, por lo cual esta investigación tuvo como objetivo ajustar modelos alométricos para estimar biomasa aérea por componentes en árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. con la finalidad de estimar precisamente la biomasa y el carbono para futuras plantaciones de teca.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en una plantación de 841 ha de *T. grandis* de uno a seis años de edad, localizada en el municipio de Tizimín, en la región noreste de Yucatán. Geográficamente se ubica entre los 21° 19' 40.19" y 21° 20' 15.38" de latitud norte y entre los 87° 48' 15.30" y 87° 45' 28.39" de longitud oeste (Figura 1), las coordenadas se obtuvieron con un GPS Garmin Etrex 10 Datum WGS84. La temperatura media anual es de 25.3 °C, con precipitación media anual de 1 167 mm, el clima es cálido subhúmedo con lluvias regulares en verano, en el área predominan suelos leptosoles, luvisoles y phaeozems, la orografía que se presenta es plana y la altitud de 19 msnm (García 2004).

Tamaño y muestreo de los árboles

El estudio se realizó en 16 sitios permanentes que tiene la plantación para fines de investigación, los sitios son de 27 x 27 m (729 m²). La biomasa se obtuvo mediante el método directo, para lo cual se derribaron 32 individuos, dos árboles representativos por cada sitio (Montes-de-Oca *et al.* 2020), el muestreo de los árboles fue de manera selectiva, libre de enfermedades y de daños mecánicos en su

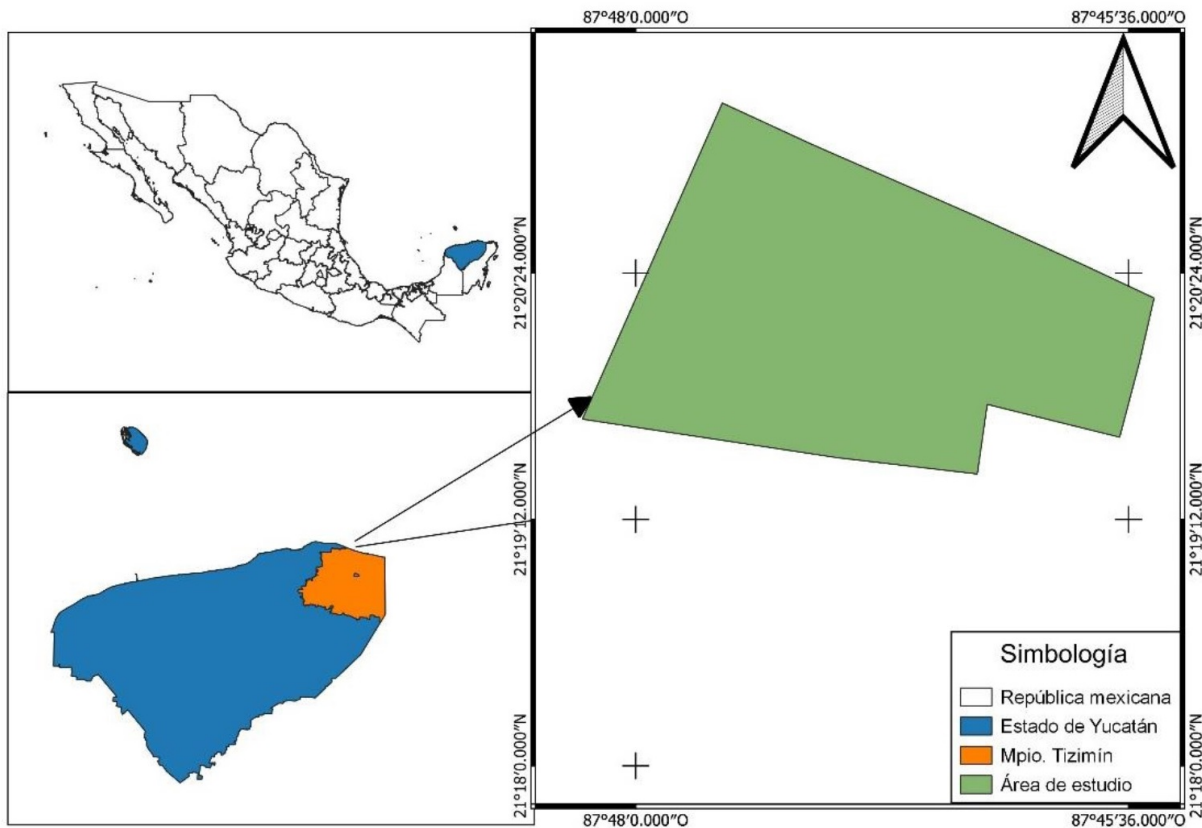


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

estructura (Jiménez *et al.* 2020).

VARIABLES EVALUADAS

Antes del derribo de los árboles se midió el diámetro normal, con una cinta diamétrica modelo 283D/5m *Forestry Suppliers*[®] y la altura total, con una pistola haga[®] (W- Germany). Una vez derribado los árboles se separaron los diferentes componentes, hojas con ramas finas menores de 1 cm de diámetro, ramas y fuste, determinando el peso verde total de cada componente. De cada componente se extrajeron tres submuestras, para determinar el peso verde en campo mediante una báscula romana de 100 kg de capacidad. Después las submuestras se secaron en una estufa marca Riossa[®] a 105 °C, hasta obtener su peso constante, para luego obtener el peso en seco con una báscula digital (Es-Series-ES6R) de 2 kg de capacidad y 1 g de precisión. Con los datos obtenidos se calculó la

relación peso seco/peso verde promedio por componente. La biomasa por componente se obtuvo multiplicando el peso verde total de cada componente por su respectiva relación. La biomasa aérea por árbol fue mediante la suma de cada uno de los componentes (Montoya *et al.* 2018).

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se ajustaron modelos lineales y no lineales en la estimación de biomasa en cada uno de los componentes (Tabla 1), las ecuaciones han sido utilizadas en distintos ecosistemas y regiones (Fonseca *et al.* 2009, Gerardo *et al.* 2018, Navarro *et al.* 2020). Los modelos se ajustaron con el método de mínimos cuadrados ordinarios en el paquete stats del software R[®] (R Core Team 2022). Los criterios de decisión para seleccionar el mejor ajuste de cada modelo por componente fue mediante el mayor coeficiente determinación, el menor error estándar y el

Tabla 1. Modelos lineales y no lineales.

N°	Nombre	Ecuación matemática
Lineales		
1	Variable combinada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d^2 * h)$
2	Variable combinada generalizada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d^2) + \beta_2 * (h) + \beta_3 * (d^2 * h)$
3	Meyer modificada	$B = \beta_0 + \beta_1 * (d) + \beta_2 * (d * h) + \beta_3 * (d^2 * h)$
No lineales		
4	Potencial	$B = \beta_0 * d^{\beta_1}$
5	Potencial variable combinada	$B = \beta_0 * (d^2 * h)^{\beta_1}$

B = biomasa (kg); β_0, \dots, β_3 = coeficientes de regresión; d = diámetro normal del árbol (cm); h = altura total (m).

menor número de variables independientes (Yerena et al. 2020), estos criterios son considerados para evaluar la calidad del ajuste de un modelo alométrico (Picard et al. 2012). Una vez seleccionado el mejor modelo en biomasa aérea, se probaron diferentes modelos alométricos ya establecidos para ver el comportamiento de su estimación en la biomasa.

RESULTADOS

Los árboles evaluados registraron diámetros de 5.75 a 15.00 cm, y alturas de 5.60 a 13 m, con biomasa promedio de 3.79 kg en hojas, 8.07 kg en ramas y 10.92 kg en el fuste, siendo este último componente el de mayor valor en biomasa (Tabla 2).

Tabla 2. Variables dasométricas de *Tectona grandis*.

n	Variables	Promedio	Mínimos	Máximos
32	d	10.45	5.75	15.00
	h	8.47	5.60	13.00
	Bh	3.79	0.77	9.84
	Br	8.07	0.68	21.46
	Bf	10.92	1.26	22.91
	Bt	22.77	3.26	54.21

n = Tamaño de muestra; d = diámetro normal (cm); h = altura (m); Bh = biomasa de hojas (kg); Br = biomasa de ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); Bt = biomasa total (kg).

Los coeficientes de cada uno de los modelos presentaron buena significancia ($P < 0.05$), sin embargo, el modelo cuatro presentó menor error en los coeficientes del modelo en los componentes: hojas, ramas, fuste y total, teniendo valores de 0.000611 a 0.021320 en β_0 y para el β_1 de 2.612900 hasta 3.611097 (Tabla 3).

De cinco ecuaciones matemáticas probadas en cada componente, se seleccionó el modelo no

lineal denominado potencial ($B = \beta_0 * (d)^{\beta_1}$) debido a que presentó los mejores ajustes en cada uno de los componentes (Tabla 4). Los mejores coeficientes de determinación ($R^2 = 0.96$) se presentaron en biomasa de fuste y total, con errores de 1.31 a 3.17 kg, sin embargo, los ajustes menores se registraron en ramas y hojas con una R^2 de 0.88 y 0.92, con errores de 0.81 a 2.13 kg (Tabla 5).

Las figuras (2A-D) fueron representadas con el mejor modelo (cuatro) ilustrando el comportamiento de las curvas de biomasa para cada uno de los componentes, en los coeficientes de variación hubo pocas diferencias interespecíficas en los componentes de biomasa, excepto para el de ramas. La ecuación utilizada en árboles de *T. grandis* sólo contempla el diámetro normal y predice la biomasa aérea eficientemente con diámetros menores de 20 cm (Figura 3).

La biomasa porcentual de ramas fue dos veces más que la biomasa de hojas, siendo estos dos componentes menores al del fuste. De los individuos derribados se obtuvo una biomasa de 121 kg (17%) en hojas, 258 kg en ramas (35%) y 349 kg en fuste (48%) (Figura 4).

DISCUSIÓN

El tamaño de muestra de este estudio es similar al que realizaron González et al. (2014) donde evaluaron 32 individuos para fijar biomasa en teca, aunque también hay otros autores que han seleccionado entre 20 y 30 individuos para estimar biomasa en teca (Gerardo et al. 2018, Rodríguez et al. 2018). Mientras que Kraenzel et al. (2003) y Correa y Romero (2016), reportan entre 40 y 49 árbo-

Tabla 3. Coeficientes de los modelos lineales y no lineales por componente en *Tectona grandis*.

N°	β_0	EEC	β_1	EEC	β_2	EEC	β_3	EEC
Biomasa Hojas								
1	-0.448595	0.479	0.004048	0.000	.	.	.	.
2	5.478912	1.843	-0.001140	0.014	-1.052907	0.259	0.007033	0.001
3	2.329351	1.467	0.208056	0.174	-0.147982	0.023	0.012317	0.001
4	0.000611	0.000	3.611097	0.263	.	.	.	.
5	0.000895	0.001	1.194432	0.155	.	.	.	.
Biomasa Ramas								
1	-0.976093	1.031	0.008636	0.000	.	.	.	.
2	2.651889	4.764	0.059039	0.037	-0.958655	0.670	0.004000	.
3	-2.641592	4.023	1.124190	0.479	-0.194263	0.063	0.016067	0.004
4	0.003508	0.002	3.220557	0.302	.	.	.	.
5	0.004204	0.004	1.086656	0.152	.	.	.	.
Biomasa Fuste								
1	-0.017560	0.756	0.010443	0.000	.	.	.	.
2	-2.852905	2.821	0.094593	0.022	0.008949	0.396	0.002620	0.002
3	-6.808438	2.432	1.493362	0.289	-0.091857	0.038	0.010088	0.002
4	0.021320	0.007	2.612900	0.145	.	.	.	.
5	0.015479	0.008	0.946041	0.077	.	.	.	.
Biomasa Total								
1	-1.442249	1.969	0.023127	0.001	.	.	.	.
2	5.277896	6.914	0.152492	0.055	-2.002612	0.972	0.016053	0.006
3	-7.120680	5.886	2.825608	0.701	-0.434102	0.092	0.038471	0.007
4	0.018321	0.007	2.971090	0.155	.	.	.	.
5	0.017270	0.012	1.033580	0.101	.	.	.	.

N° = número del modelo; β_0, \dots, β_3 = coeficientes; EEC = Error estándar de los coeficientes.

Tabla 4. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de *Tectona grandis*.

N°	R ²	EE	X
Biomasa Hojas			
1	0.77	1.34	1
2	0.91	0.86	3
3	0.92	0.81	3
4	0.92	0.81	1
5	0.78	1.32	1
Biomasa Ramas			
1	0.77	2.88	1
2	0.87	2.21	3
3	0.87	2.23	3
4	0.88	2.13	1
5	0.77	2.91	1
Biomasa Fuste			
1	0.90	2.12	1
2	0.95	1.50	3
3	0.96	1.35	3
4	0.96	1.31	1
5	0.90	2.10	1
Biomasa Total			
1	0.87	5.50	1
2	0.96	3.21	3
3	0.96	3.26	3
4	0.96	3.17	1
5	0.87	5.54	1

N° = Número del modelo; R² = Coeficiente de determinación; EE = Error estándar (kg); X = Número de variables independientes.

les de teca para estimar su biomasa. Lo anterior indica que el tamaño de muestra mínimo para estimar la biomasa aérea es de 20 individuos, siendo este valor adecuado para evaluar la biomasa en árboles, sin embargo, en México más del 50% de los estudios para cuantificar biomasa han utilizado de 10 a 40 árboles (Montoya *et al.* 2018), cabe mencionar que existe un método eficaz para obtener el tamaño óptimo en una especie, mediante el cálculo de la varianza mínima de las observaciones (Méndez *et al.* 2012).

En una plantación de teca de cinco años de edad González *et al.* (2014) reportan un diámetro y altura promedio de 12.0 cm y 10.60 m, respectivamente. También Viriyabuncha *et al.* (2001) reportan diámetros de 4.4 a 11.7 cm y altura de 5.50 a 10.80 m, a pesar de que los estudios antes indicados se realizaron en diferentes áreas geográficas, estos valores dasométricos coinciden con el presente estudio. Aunque para el caso de una especie tropical, *Hevea brasiliensis* con cinco años de edad, se reporta un crecimiento promedio en diámetro de 14.05 cm y altura media de 11.33 m, lo que indica que la especie tiene un mayor crecimiento en comparación

Tabla 5. Modelo ajustado por componente en *Tectona grandis*

N°	β_0	EEC	β_1	EEC	R ²	EE	X
Biomasa Hojas							
4	0.000611	0.0000	3.611097	0.263	0.92	0.81	1
Biomasa Ramas							
4	0.003508	0.002	3.220557	0.302	0.88	2.13	1
Biomasa Fuste							
4	0.021320	0.007	2.612900	0.145	0.96	1.31	1
Biomasa Total							
4	0.018321	0.007	2.971090	0.155	0.96	3.17	1

N° = número del modelo; β_0, \dots, β_1 = coeficientes; EEC = Error estándar de los coeficientes; R² = Coeficiente de determinación; EE = Error estándar (kg); X = Número de variables independientes.

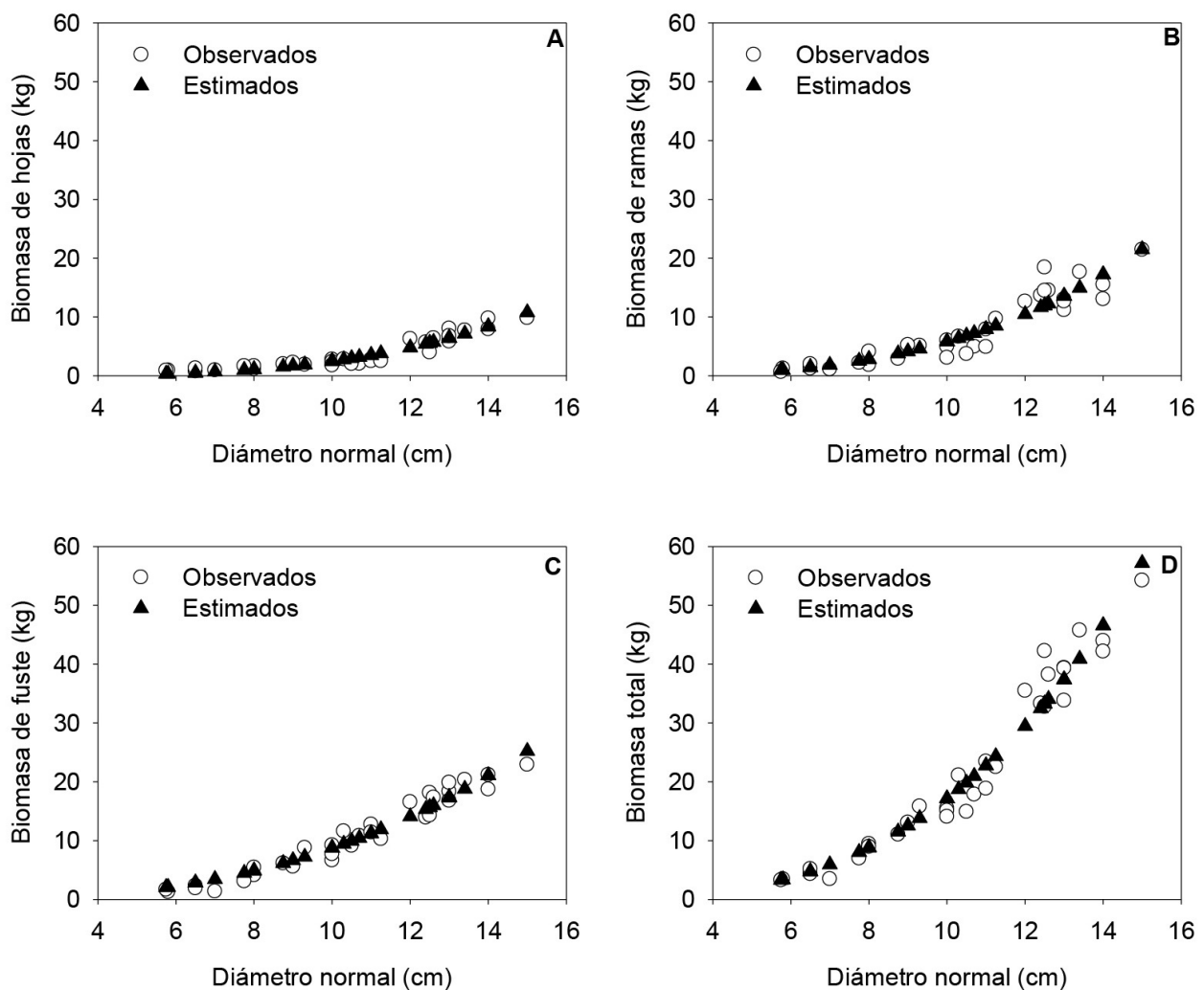


Figura 2. (A-D). Biomasa por componente de *Tectona grandis*.

con la teca (López *et al.* 2016).

Las plantaciones forestales desempeñan un

papel importante ya que disminuyen el bióxido de carbono que hay en la atmósfera a un ritmo mayor,

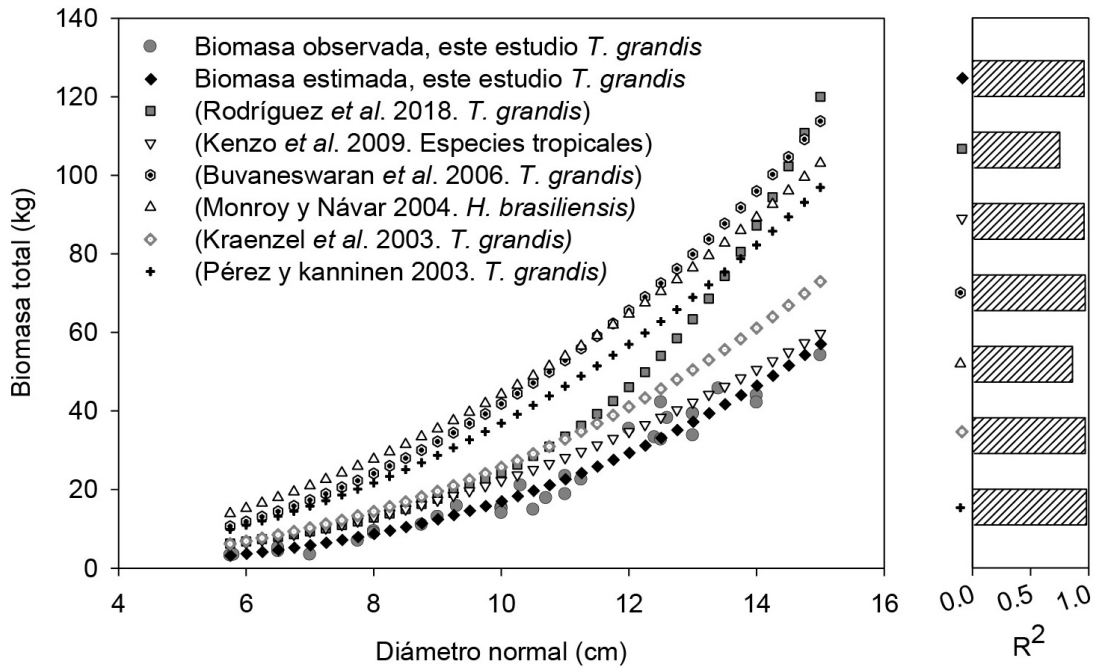


Figura 3. Comportamiento de la biomasa aérea observada y estimada de *Tectona grandis* con la biomasa estimada de varios modelos alométricos.

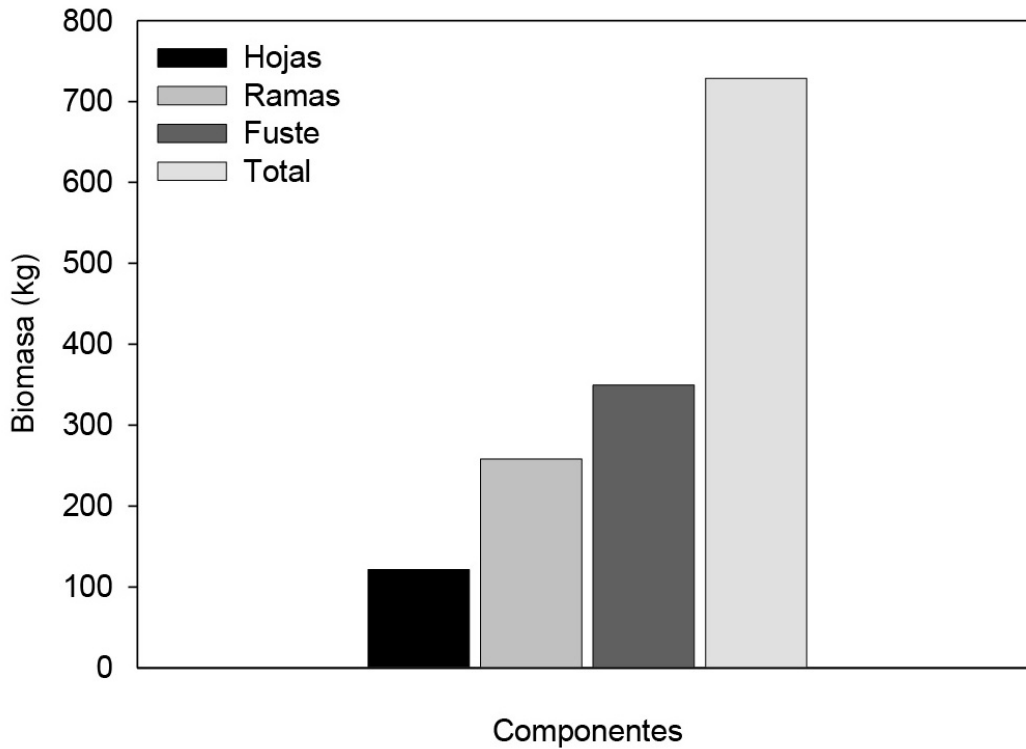


Figura 4. Reserva de biomasa aérea por componentes (32 individuos).

debido al rápido crecimiento que tienen y sobre todo la cantidad de biomasa que almacenan en su estructura vegetal (López *et al.* 2018, Nirala *et al.* 2018). La biomasa tiende a presentar distintos valores en cada uno de los componentes, debido a las diferentes condiciones que rigen el crecimiento en los árboles principalmente la genética, el clima y el suelo (Pacheco *et al.* 2007). Al respecto, González *et al.* (2014) reportan una biomasa de teca de cinco años de edad mayor a la encontrada en el presente estudio, la cual fue de 16.78, 18.93 y 37.47 kg en ramas, fuste y total, respectivamente, en cambio para el componente hojas (1.76 kg) fue menor. Mientras que en Nigeria, para teca a cinco años de edad se reporta que almacena 5.01 kg de biomasa en hojas y 7.37 kg en ramas, valores que son similares a los encontrados en el presente estudio, pero para el componente fuste (29.70 kg) fue superior (Mbaekwe y Mackenzie 2008).

De manera general, el modelo 4 presentó el mismo signo positivo en la ordenada al origen y la pendiente para los diferentes componentes. Los coeficientes de pendiente (β_1) 3.611097 en biomasa de hojas y (β_1) 3.220557 en biomasa total presentan cierta similitud, con valores superiores que el resto de los componentes. Así mismo los componentes fuste y total presentan una similitud en sus valores de β_0 (0.021320 y 0.018321) y la pendiente ($\beta_1 = 2.612900$ y 2.971090). En varios estudios han reportado coeficientes de regresión similares para la biomasa total (Viriyabuncha *et al.* 2001, Kenzo *et al.* 2009, Ounban *et al.* 2016). Pero también hay estudios que difieren en sus coeficientes de regresión en cada uno de sus componentes con modelos no lineales en teca (Murillo *et al.* 2015, Buvanewaran *et al.* 2006).

Ajustar cada uno de los componentes (hojas, ramas y fuste) es importante ya que se cuantifica la biomasa aérea. Las hojas en árboles de teca son de gran aportación a la captura de biomasa, por ello investigadores han estudiado la cantidad de biomasa en hojas y han registrado que una sola variable independiente ajusta el modelo alométrico, reportando coeficientes de determinación de R^2 menores de 0.83 y errores de 0.19 kg (Murillo *et al.* 2015). Sin embargo, en el presente estudio, el componente ramas

presentó el menor coeficiente de determinación y el mayor error de estimación que el resto de sus componentes, lo que coincide con Aguirre y Jiménez (2011) quienes afirman que el menor ajuste ocurre en el componente ramas. De igual manera Buvanewaran *et al.* (2006) ajustaron un modelo potencial en plantaciones de teca con una R^2 de 0.71 y error de 0.33 kg. La variabilidad del componente ramas no solo se presenta en teca, sino también en otras especies, como en *Eucalyptus grandis* donde Winck *et al.* (2015) reportan un R^2 de 0.83, siendo este coeficiente de determinación inferior al resto de componentes. El componente fuste presentó los mejores ajustes en la biomasa aérea, similarmente Ounban *et al.* (2016) reportan un R^2 de 0.97 en un estudio realizado en plantaciones de teca en Tailandia, lo mismo sucede en árboles tropicales donde han registrado un R^2 de 0.96 en el fuste, cabe mencionar que los errores que se presentan (0.212 kg) son diferentes al presente estudio (Kenzo *et al.* 2009). En varios estudios, se ha estimado la biomasa aérea en árboles, donde se ha utilizado sólo el diámetro normal con buen ajuste (Méndez *et al.* 2011, Carrillo *et al.* 2016, Montoya *et al.* 2018). En una plantación de teca Kenzo *et al.* (2020) obtuvieron un $R^2 \geq 0.96$, con errores no mayores de 0.21 kg, de igual forma Carrillo *et al.* (2016) reportan un $R^2 = 0.98$, ambos estudios son ajustados con el diámetro normal, el cual tiene buena correlación con la biomasa aérea. También hay estudios en teca que reportan un $R^2 < 0.77$ y errores de 9.24 kg, siendo este ajuste inferior al de esta investigación (Ebuy *et al.* 2011, Chukwu y Osho 2018, Gerardo *et al.* 2018). El ajuste que se encontró coincide con el de otros investigadores (Kraenzel *et al.* 2003, Perez y Kanninen 2003, Kenzo *et al.* 2009). Pero algunos estudios reportan un R^2 menor a 0.8 (Monroy y Návar 2004, Rodríguez *et al.* 2018).

La teca pierde gran parte de sus hojas en la etapa de su desarrollo, por lo que es necesario conocer la biomasa de este componente (Pérez y Kanninen 2003). La contribución de la biomasa en hojas tiende a hacer mayor en los primeros años (Fernández *et al.* 2013), es decir, en diámetros menores, sin embargo, conforme va creciendo el árbol la biomasa en hojas disminuye, es por ello el

componente hojas presentó una variación de 21.37% de la biomasa estimada respecto a la observada. La biomasa de ramas presentó la mayor variación (26.41%) con el resto de componentes, esta variación se presenta mayormente en los últimos diámetros, estas diferencias de variación en la biomasa de ramas es normal, debido a la diferencia de crecimiento que tiene cada componente en el árbol (Aguirre y Jiménez 2011). El componente fuste es el que absorbe mayor biomasa respecto a hojas y ramas y por consecuencia presenta menor variación (12.01%), esto se debe a que el árbol va creciendo y la biomasa tiende a aumentar (Fernández et al. 2013). El componente total presentó un coeficiente de variación de 13.92%, presentando una dispersión mayor en los últimos diámetros de la biomasa estimada respecto a la observada, la acumulación de biomasa total es variable y dependen de las condiciones ambientales que el árbol tiene para desarrollarse.

Las variables de diámetro y altura son las más utilizadas para la estimación de la biomasa aérea, ya que estas variables se correlaciona con cada uno de los componentes de la biomasa, sin embargo, en este estudio, la biomasa aérea se estima con una sola variable, lo que coincide con otros estudios donde estiman la biomasa con el diámetro normal, reportando una similitud en sus estimaciones de biomasa en *T. grandis* y para especies tropicales (Kraenzel et al. 2003, Kenzo et al. 2009, Rodríguez et al. 2018). Sin embargo, otros autores difieren en la estimación de la biomasa en diámetros superiores a 20 cm (Monroy y Návar 2004, Buvanewaran et al. 2006).

En teca la mayor cantidad porcentual de biomasa aérea se distribuyó en el componente fuste, este componente es el que almacena la mayor biomasa en sus tejidos, obteniendo casi el 50% de su biomasa, este porcentaje se sitúa dentro de lo reportado para la especie de teca (González et al. 2014, Murillo et al. 2015, Gerardo et al. 2018). La segunda fracción porcentual en la distribución de biomasa se reportó en ramas, el porcentaje se ubica dentro de los rangos reportados para especies tropicales (Monroy y Návar 2004, López et al. 2016). Sin embargo, el menor porcentaje se registró en hojas, este componente coincide con otros investigadores, aunque el porcentaje que registran es del 3 y 5% en plantaciones de teca con edades superiores a 14 años, siendo valores pocos representativos en la biomasa aérea (Buvanewaran et al. 2006, Gerardo et al. 2018). La proporción de biomasa en los componentes del árbol pueden ser diferentes con otras especies debido a su morfología (Carrillo et al. 2016).

CONCLUSIONES

El modelo alométrico potencial presentó el mejor ajuste en los componentes evaluados y estima de forma eficientemente la biomasa en árboles pequeños de *T. grandis*, el modelo contempla solo el diámetro normal, lo cual es una ventaja por ser una variable fácil y rápida de medir en campo. De la biomasa aérea total el mayor porcentaje en biomasa almacenada, se registró en el componente fuste, posteriormente en ramas y por último en hojas.

LITERATURA CITADA

- Aguirre COA, Jiménez PJ (2011) Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2: 73-84.
- Buvanewaran C, George M, Perez D, Kanninen M (2006) Biomass of teak plantations in Tamil nadu, India and Costa Rica compared. *Journal of Tropical Forest Science* 18: 195-197.
- Carrillo AF, Acosta MM, Jiménez CCR, González ML, Etchevera BJD (2016) Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 681-691.
- Chukwu O, Osho AJS (2018) Basal area-stump diameter models for *Tectona grandis* Linn. F. Stands in Omo Forest Reserve, Nigeria. *Journal of forest and environmental science* 34: 119-125.

- Correa GHM, Romero HOM (2016) Cuantificación de biomasa aérea total, carbono almacenado y CO₂ fijado en árboles de teca. Caso de estudio. *Revista del Desarrollo Local Sostenible* 9: 1-9.
- Cuenca ME, Jadán O, Cueva K, Aguirre C (2014) Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ* 4: 21-31.
- Ebuy J, Lokombe JP, Ponette Q, Sonwa D, Picard N (2011) Allometric Equation for Predicting Aboveground Biomass of Three Tree Species. *Journal of Tropical Forest Science* 23: 125-132.
- Fernández MJ, Murillo R, Portuguez E, Fallas JL, Rios V, Kottman F, Verjans JM, Mata R, Alvarado A (2013) Nutrient concentration age dynamics of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. *Forest Systems* 22: 123-133.
- Fonseca GW, Alice GF, Rey BJM (2009) Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30: 36-47.
- Fonseca GW (2017) Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales* 51: 91-109.
- FAO (2015) Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. By Kollert, W, Walotek, P. J. Planted Forests and Trees Working Paper FP/49/E. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/900604da-befc-4b13-92bd-7336ab84f594/>. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2022.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Serie Libros, Núm. 6. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México. México 97p.
- Gerardo LH, Estuardo VE, Alvarado A (2018) Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* 42: 137-153.
- González MAJ, Rojas HJ, Jiménez GRM, Chavarría ÑFJ (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: 12-18.
- Jiménez PJ, Telles AR, Alanís RE, Yerena YJI, García GDA, Gómez CM (2020) Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11: 32-56.
- Kenzo T, Ichie T, Hattori D, Itioka T, Handa C, Ohkubo T, Jawa KJ, Nakamura M, Sakaguchi M, Takahashi N, Okamoto M, Tanaka OA, Sakurai K, Ninomiya I (2009) Development of allometric relationships for accurate estimation of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 25: 371-386.
- Kenzo T, Woraphun H, Yoneda R, Tedsorn N, Vacharangkura T, Hitsuma G, Noda I (2020) General estimation models for above- and below-ground biomass of teak (*Tectona grandis*) plantations in Thailand. *Forest Ecology and Management* 457: 1-12.
- Kraenzel M, Castillo A, Moore T, Potvin C (2003) Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management* 173: 213-225.
- López HG, Vaidés, EE, Alvarado A (2018) Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* 42: 137-153.
- López RLY, Domínguez DM, Martínez ZP, Zavala CJ, Gómez GA, Posada CS (2016) Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosque* 22: 49-60.

- Méndez GJ, Luckie NSL, Capó AMA, Nájera LA (2011) Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. Pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45: 479-491.
- Méndez GJ, Turlan MOA, Ríos SJC, Nájera LJA (2012) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3: 57-72.
- Mbaekwe EI, Mackenzie JA (2008) The use of a best-fit allometric model to estimate aboveground biomass accumulation and distribution in an age series of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations at Gambari Forest Reserve, Oyo State, Nigeria. *Tropical Ecology* 47: 259-270.
- Monroy RC, Návar CJD (2004) Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.
- Montes-de-Oca CE, Salvador GA, Nájera LJA, Corral RS, Graciano LJJ, Méndez GJ. (2020) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill. *Colombia Forestal* 23: 89-98.
- Montoya JJC, Méndez GJ, Sosa DL, Ruiz GCG, Zermeño GA, Nájera LJA, Manzano CMG, Velázquez RAS (2018) Ecuaciones de Biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. *Madera y Bosques* 24: 1-11.
- Murillo R, Alvarado A, Mark VJ (2015) Concentración y acumulación de nutrimentos en la biomasa aérea de plantaciones de teca de 3 a 18 años en la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense* 39: 117-136.
- Navarro MJ, Godínez JF, López LMA, Rosas AJL, Juárez LAL, Reyes UM (2020) Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* y *Quercus resinosa* en Guerrero, México. *Madera y Bosques* 26: 1-12.
- Nirala D, Khanduri VP, Sankanur MS (2018) Biomass and carbon stock assessment in different age group plantations of Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) in Bhabar and Shivalik Regions of Uttarakhand. *International Journal of Bioresource and Stress Management* 9: 379-382.
- Nirmal KJI, Kumar NR, Kumar BR, Sajish RP (2009) Quantification of nutrient content in the aboveground biomass of teak plantation in a tropical dry deciduous forest of Udaipur, India. *Journal of Forests Science* 55: 251-256.
- Ounban W, Puangchit L, Diloksumpun S (2016) Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn.f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. *Plantations in Thailand. Agriculture and Natural Resources* 50: 48-53.
- Pacheco EFC, Andrete A, Gómez GA, Fierros GAM, Cetina AVM, Vaquera HH (2007) Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 51-254
- Pérez CLD, Kanninen M (2003) Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15: 199-213.
- Picard N, Saint AL, Henry M (2012) Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Rome, Montpellier, 223p.

- R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2022.
- Rodríguez M, Arias D, Valverde JC, 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 Mesoamericana Kurú* 15: 61-68.
- Schlegel B, Gayoso J, Guerra J (2000) Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF-UACHINFOR. Valdivia, Chile. 20p.
- Viriyabuncha C, Chittachumnonk P, Sutthisrisinn C, Samran S, Peawsaad K (2001) Adjusting equation to estimate the above-ground biomass of teak plantation in Thailand In: Chittachumnonk P (ed) *Proceeding of 7th Silvicultural Seminar*. University, Bangkok. Thailan. pp: 239-260.
- Winck RA, Fassola HE, Barth SR, Crechi EH, Keller AE, Videla D, Zaderenko C (2015) Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. *Ciencia Florestal* 25: 595-606.
- Yerena YJI, Jiménez PJ, Marroquín MP, Alanís RE, Cuellar RLG, Aguirre COA (2020) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco. *Interciencia* 45: 377-383.