



Ecuaciones alométricas aditivas para estimar biomasa aérea y concentración de carbono de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg.

Additive allometric equations to estimate aboveground biomass and carbon concentration of *Piscidia piscipula* (L.) Sarg.

Juan Carlos Cuevas Cruz¹, Martín Aquino Ramírez^{2*}, Ramón de la Cruz Kú Chalé³, Isidro Javier Morales Sosa³

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario del Anáhuac. Texcoco, Estado de México, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-Sureste Campo Experimental Edzná. Campeche, México.

³ Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Península de Yucatán. Ingeniería en Desarrollo Agroforestal. Mérida, Yucatán, México

* Autor de correspondencia.
martin.aquino.colpos@gmail.com

RESUMEN

Las ecuaciones alométricas específicas son una herramienta clave para estimar la biomasa aérea total y por componente y el carbono de los bosques tropicales. El objetivo de este estudio fue ajustar modelos alométricos para estimar la biomasa aérea y por componente estructural de árboles de *Piscidia piscipula* en una selva mediana subperennifolia de Escárcega, Campeche, México. A través de un muestreo destructivo de 17 individuos de distintas categorías diámetricas (5 cm a 55 cm) se obtuvieron muestras de fuste, ramas y ramillas con hojas para determinar su peso seco. Se ajustaron dos sistemas de ecuaciones no lineales utilizando al diámetro normal (Dn) y la altura total (AT) como variables predictoras con el método generalizado de momentos. La propiedad de aditividad fue asegurada al definir a la biomasa aérea total como la suma de las estimaciones de la biomasa de cada componente estructural del árbol. La concentración de carbono expresado como porcentaje de la biomasa fue determinada en cada componente. El sistema de ecuaciones alométricas basado en el modelo $y = e^{[b_0 + b_1 \ln(Dn) + b_2 \ln(AT)]}$ mostró los mejores estadísticos de ajuste y explicó más de 89% de la variabilidad de la biomasa de los componentes y total del árbol. En *P. piscipula*, la mayor proporción de biomasa se concentró principalmente en el fuste (60.4%), luego en las ramas (36.8%) y finalmente las ramillas con hojas (2.7%). La concentración de carbono promedio fue de $49.9 \pm 0.48\%$. Las ecuaciones alométricas generadas proporcionan estimaciones confiables de biomasa que garantizan la aditividad entre los componentes estructurales de *P. piscipula*.

PALABRAS CLAVE: árboles tropicales, carbono, distribución de biomasa, jabin, modelos alométricos, muestreo destructivo.

ABSTRACT

Specific allometric equations are a key tool to quantify total and component aboveground biomass and carbon of tropical forests. The aim of this study was to fit allometric models to estimate aboveground biomass and structural components of *Piscidia piscipula* trees of semi-evergreen tropical forest in Escárcega, Campeche, Mexico. Through a destructive sampling of 17 individuals of different diameter categories (5 to 55 cm), samples of the stem, branches, and twigs with leaves were obtained to determine their dry weight. We fitted two systems of nonlinear equations using tree diameter at breast height (Dn) and total height (AT) as predictor variables with the Generalized Method of Moments (GMM). The additivity property was ensured by establishing the total aboveground biomass as the sum of the estimates of the biomass of each structural component of the tree. The carbon concentration expressed as a percentage of the biomass was determined in each component. The system of allometric equations based on the model $y = e^{[b_0 + b_1 \ln(Dn) + b_2 \ln(AT)]}$ showed the best fit statistics and explained more than 89% of the variability of the biomass of the components and the total for the tree. In *P. piscipula*, the highest proportion of biomass was concentrated firstly in the stem (60.4%), secondly in the branches (36.8%), and thirdly, in twigs with leaves (2.7%). The average carbon concentration was $49.9 \pm 0.48\%$. The allometric equations generated provide reliable estimates of biomass ensuring additivity between structural components of *P. piscipula*.

KEYWORDS: tropical trees, carbon, biomass distribution, jabin, allometric models, destructive sampling.

INTRODUCCIÓN

La evaluación y cuantificación precisa del potencial de secuestro de carbono de los árboles se ha convertido en un tema de interés debido a que los bosques desempeñan un papel importante en la adaptación y mitigación del cambio climático global (Bayen et al., 2020). Los árboles capturan y almacenan carbono en forma de biomasa a través del proceso de fotosíntesis y, con ello, se contrarrestan los incrementos en los niveles atmosféricos de dióxido de carbono (Dimobe et al., 2018; Ganamé et al., 2020); por lo tanto, la estimación de la biomasa es crucial para determinar el potencial de los bosques para almacenar carbono (Djomo y Chimi, 2017).

Uno de los métodos más utilizados para la estimación de la biomasa forestal aérea son las ecuaciones alométricas, que permiten cuantificar de manera confiable la biomasa de los bosques como la suma de la biomasa estimada de los árboles individuales (Ganamé et al., 2021). Para el desarrollo de las ecuaciones alométricas se requiere de un muestreo destructivo y posteriormente se relaciona la masa seca total y por componentes con variables dendrométricas fáciles de medir en los árboles, como diámetro normal, altura total, área basal, diámetro de la copa y densidad de madera (Eker et al., 2017; Cuevas y Aquino, 2020).

Para cada árbol muestreado, la biomasa aérea corresponde a la suma de la biomasa de todos sus componentes estructurales, tales como, fuste, ramas, hojas (Wang et al., 2018). Con frecuencia, al ajustar los modelos de biomasa por separado, la suma de las predicciones de los componentes no es igual a la predicción de la biomasa total (Bi et al., 2010). La falta de aditividad es una característica indeseable al ajustar un sistema de ecuaciones alométricas porque esta inconsistencia se traslada desde el nivel del árbol hasta las estimaciones por unidad de superficie y del bosque, afectando la precisión de las existencias en los inventarios de la cantidad de biomasa y carbono forestal (Behling et al., 2018).

En la Península de Yucatán, diferentes ecuaciones alométricas han sido generadas para grupos de especies de árboles tropicales en los estados de Quintana Roo y

Yucatán (Urquiza-Haas et al., 2007; Ramírez et al., 2017). Sin embargo, la información de la distribución de biomasa hacia los componentes estructurales de los árboles tropicales es desconocida, puesto que estas ecuaciones fueron desarrolladas para estimar solamente la biomasa aérea total (Hernández-Stefanoni et al., 2020). Por lo que la información sobre la distribución de biomasa es primordial para comprender los efectos del entorno abiótico, tamaño del árbol, la ontogenia y las prácticas de manejo en la alometría de los árboles, factores que influyen en la productividad forestal y la dinámica del ciclo de carbono (Bayen et al., 2020).

Piscidia piscipula (L.) Sarg. (jabín) es una especie arbórea de importancia ecológica por su dominancia y abundancia en las selvas medianas subperennifolias del estado de Campeche (Echeverría et al., 2014; Zamora-Crescencio et al., 2018). Asimismo, el jabín es localmente considerado como árbol multipropósito y empleado en los sistemas silvopastoriles y el manejo tradicional (Zamora-Crescencio et al., 2009). La cuantificación de la biomasa aérea de árboles de *P. piscipula*, permitirá determinar sus contribuciones en la captura y almacenamiento de CO₂, lo cual podrá representar un beneficio adicional para ejidos y comunidades de la Península de Yucatán, bajo esquemas de pago por servicios ambientales, favoreciendo la conservación de poblaciones y establecimiento de plantaciones.

OBJETIVOS

Los objetivos del presente estudio fueron desarrollar ecuaciones alométricas aditivas para estimar la biomasa por componente estructural y total de *P. piscipula* en una selva mediana subperennifolia de Escárcega, Campeche, México, y estimar la concentración de carbono para cada componente estructural de los árboles muestreados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación fue realizada en una superficie de 8.0 ha de vegetación secundaria arbórea, derivada de la selva mediana



subperennifolia del municipio de Escárcega, Campeche, México. El sitio se localiza en las coordenadas $18^{\circ} 30' 52''$ N y $90^{\circ} 39' 23''$ O, a una altitud de 60 m (Fig. 1). El clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (2004) corresponde a cálido subhúmedo con lluvias en verano A(w₁), con temperatura media anual de 26 °C, máximos de 42 °C y mínimos de 4.5 °C. La precipitación media anual es de 1300 mm. El tipo de suelo del lugar corresponde a un vertisol (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [Inegi], 2007).

Muestreo destructivo

El trabajo de campo se efectuó en los meses de septiembre a noviembre de 2018. Mediante un muestreo destructivo, como lo sugieren Picard et al. (2012), se cuantificó la biomasa área a partir de los componentes estructurales de los árboles. Los individuos seleccionados fueron aquellos

que no mostraron la presencia de plagas ni enfermedades y que no presentaran algún daño físico o mecánico.

En la construcción de ecuaciones alométricas se recomienda el derribo de al menos 30 individuos (Picard et al., 2012), sin embargo, no fue posible trabajar con dicho número debido a las reglas de acceso y uso de recursos naturales que mantienen los ejidatarios. En su lugar se autorizó el derribo de 17 ejemplares, los cuales fueron seleccionados de tal manera que se abarcaran todas las categorías diamétricas del sitio de estudio; los diámetros se distribuyeron en un intervalo de 5 cm a 55 cm con alturas entre 8 m y 21 m. Distintos autores han utilizado un tamaño de muestra reducido ($n < 30$) para el ajuste de ecuaciones alométricas con resultados aceptables, por ejemplo, $n = 12$ (Gómez-Díaz et al., 2011), $n = 16$ (Ruiz-Aquino et al. 2014), $n = 21$ (Cuevas y Aquino, 2020), $n = 25$ (Martínez-Domínguez et al., 2020).

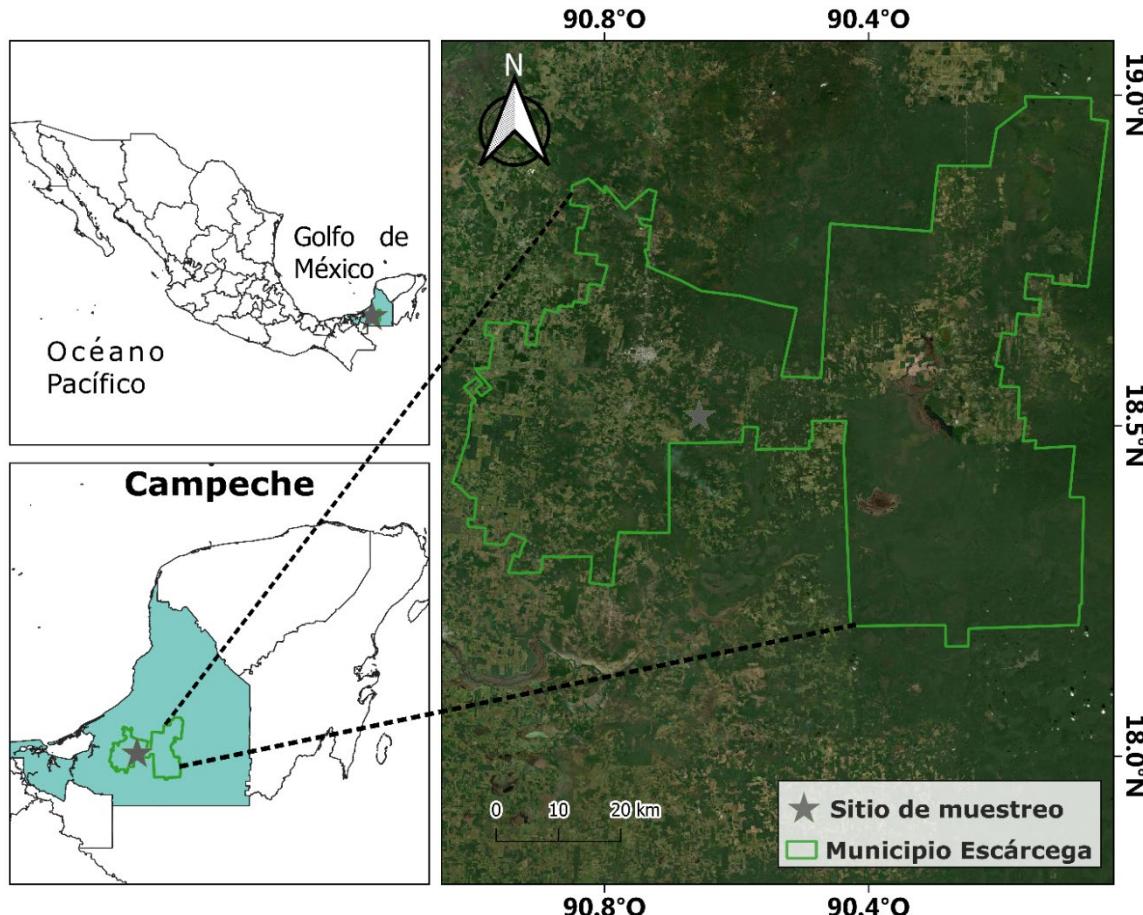


FIGURA 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Antes del derribo, a cada árbol se le midió el diámetro normal (Dn) con cinta diámetrica a una altura de 1.30 m desde el nivel del suelo, en tanto que la altura total (AT) fue medida con cinta métrica después del derribo. Los árboles extraídos fueron separados en ramillas con hojas (diámetro < 1.0 cm), ramas y fuste. El peso fresco total de cada componente fue obtenido en campo con una báscula digital de 500 kg de alcance, con una resolución de ± 0.5 kg.

El fuste fue seccionado en trozos de 1.0 m de longitud desde la base hasta la punta o hasta la primera bifurcación del árbol, y en la base de cada una de ellas se obtuvo una rodaja de aproximadamente de 5.0 cm de grosor. En tanto, la copa fue dividida en tres secciones transversales: baja, media y alta como lo indican Zhang et al. (2009), y en cada una de ellas se obtuvieron tres rodajas para las ramas y tres muestras aleatorias de 1.0 kg para las ramillas con hojas. Todas las muestras y rodajas fueron pesadas en campo para obtener los pesos frescos con una báscula electrónica, descrita en el párrafo anterior, después colocadas en bolsas de papel debidamente etiquetadas para su transporte al laboratorio, donde fueron secadas a 105 °C en una estufa con circulación forzada de aire hasta lograr un peso constante.

La biomasa de cada componente fue determinada con el factor promedio resultante de la relación peso seco/peso fresco de las muestras tomadas de cada componente. Luego se multiplicó por el peso fresco correspondiente a todo el componente. La biomasa aérea total (Bt) de cada árbol fue obtenida sumando la biomasa del fuste, ramas y ramillas con hojas.

Modelos de biomasa

Dos modelos alométricos (Ecuaciones 1 y 2) comúnmente usados fueron seleccionadas para ajustar la biomasa de cada componente estructural (fuste, ramas y hojas con ramillas) de *P. piscipula*. Estos modelos relacionan la cantidad de biomasa en función a las variables Dn y AT o la combinación de ambas variables (Dn^2AT) (Bi et al., 2015; Xiang et al., 2016).

$$y_i = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(AT)]} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$y_i = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(Dn^2AT)]} + \varepsilon_i \quad (2)$$

donde:

y_i = biomasa de cualquier componente estructural del árbol (kg)

Dn = diámetro normal (cm)

AT = altura total (m)

e = base de los logaritmos

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = coeficientes de regresión

ε_i = error aleatorio

La propiedad de aditividad se garantizó al desarrollar dos sistemas de ecuaciones alométricas basados en los modelos 1 y 2, en donde la biomasa área total fue expresada como la suma de las ecuaciones de todos los componentes estructurales del árbol (Bi et al., 2015).

La estructura del primer sistema de ecuaciones alométricas (S_1) con términos de error aditivo fue fundamentada en el modelo 1 y expresado con las ecuaciones 3, 4, 5 y 6.

$$Bf = e^{[-\beta_{10} + \beta_{11} \ln(Dn) + \beta_{12} \ln(AT)]} + \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$Br = e^{[-\beta_{20} + \beta_{21} \ln(Dn) + \beta_{22} \ln(AT)]} + \varepsilon_2 \quad (4)$$

$$Brh = e^{[-\beta_{30} + \beta_{31} \ln(Dn) + \beta_{32} \ln(AT)]} + \varepsilon_3 \quad (5)$$

$$Bt = e^{[-\beta_{10} + \beta_{11} \ln(Dn) + \beta_{12} \ln(AT)]} + \\ e^{[-\beta_{20} + \beta_{21} \ln(Dn) + \beta_{22} \ln(AT)]} + \\ e^{[-\beta_{30} + \beta_{31} \ln(Dn) + \beta_{32} \ln(AT)]} + \varepsilon_4 \quad (6)$$

El segundo sistema de ecuaciones alométricas (S_2) con términos de error aditivo se basó en el modelo 2 y expresado con las ecuaciones 7, 8, 9 y 10.

$$Bf = e^{[-\beta_{10} + \beta_{11} \ln(Dn^2AT)]} + \varepsilon_1 \quad (7)$$



$$Br = e^{[-\beta_{20} + \beta_{21} \ln(Dn^2 AT)]} + \varepsilon_2 \quad (8)$$

$$Brh = e^{[-\beta_{30} + \beta_{31} \ln(Dn^2 AT)]} + \varepsilon_3 \quad (9)$$

$$Bt = e^{[-\beta_{10} + \beta_{11} \ln(Dn^2 AT)]} \\ + e^{[-\beta_{20} + \beta_{21} \ln(Dn^2 AT)]} + \\ e^{[-\beta_{30} + \beta_{31} \ln(Dn^2 AT)]} + \varepsilon_4 \quad (10)$$

donde:

Bf , Br , Brh y Bt = biomasa en fuste, ramas, ramillas con hojas y total (kg)

β_{ij} = coeficientes de regresión

ε_1 - ε_4 = términos del error

Estimación del carbono

La concentración de carbono fue obtenida de cinco individuos representativos de todas las categorías diámetricas registradas, abarcando un intervalo de 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm y 50 cm (Gómez-Díaz et al., 2011). Para cada árbol se obtuvo una submuestra de 50 g para el fuste, ramas y ramillas con hojas. Todas las submuestas fueron llevadas al laboratorio donde se pulverizaron y se colocaron por 24 h en una estufa con circulación forzada de aire, a 70 °C. A fin de retirar la humedad absorbida del ambiente y posteriormente, fueron colocadas en un analizador automático de carbono total para medir la concentración de carbono por la técnica de combustión seca a 900 °C (Etchevers et al., 2005).

Análisis estadístico

Los coeficientes de las ecuaciones en cada sistema (S_1 y S_2) fueron estimados simultáneamente empleando el método generalizado de momentos (MGM) con el procedimiento PROC MODEL del programa Statistical Analysis System [SAS/ETS®], 2002). El MGM es útil para obtener estimaciones de parámetros eficientes en un sistema de ecuaciones con términos de error heteroscedástico sin especificar su naturaleza en una muestra pequeña (Greene, 1999; Wang et al., 2018) y, por lo tanto, se evita la dificultad de obtención de funciones de ponderación de los

componentes de biomasa que describan con precisión el diseño de la matriz de varianza del error (Bi et al., 2010).

Estadísticos de bondad de ajuste

El desempeño de los modelos en cada sistema se evaluó con base en estadísticos de bondad de ajuste como el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), la raíz del cuadrado medio del error (RMSE, kg), el error estándar (Sx, kg), el error medio absoluto porcentual (EMA, %) y la precisión con el sesgo (\bar{E} , kg) (Expresiones 11-15) (Wang et al., 2018; Cuevas y Aquino, 2020). De igual manera se consideró la significancia de los parámetros estimados ($p < 0.05$). Las ecuaciones con los valores de R^2_{adj} más altos y los valores de RMSE, Sx, EMA y sesgo más bajos fueron consideradas como los de mejor ajuste. Estos estadísticos se calcularon con las ecuaciones 11, 12, 13, 14 y 15.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)} \right] \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n - p} \quad (12)$$

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}} \quad (13)$$

$$EMA = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| / n \quad (14)$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (15)$$

donde:

y_i = biomasa total o de algún componente estructural observado (kg)

\hat{y}_i = valor predicho

\bar{y} = media

n = número de observaciones

p = número de parámetros del modelo

RESULTADOS

Los árboles derribados de *P. piscipula* presentaron un intervalo de Dn de 5.7 cm a 55.0 cm, AT de 8.1 m a 21.0 m y un peso seco de 9.4 kg a 1501.6 kg por árbol para la Bt (Tabla 1).

Distribución de la biomasa aérea

La proporción de la biomasa aérea de los componentes estructurales del árbol fue diferente a través de las distintas clases diamétricas (Fig. 2). El porcentaje de biomasa del fuste decreció gradualmente de 88%, en diámetros pequeños, a 53%, en los árboles más grandes; algo similar sucedió con la proporción de la biomasa de ramillas con hojas disminuyendo de 3.1% a 1.9% al aumentar el diámetro, mientras que los cambios en la biomasa de las ramas se relacionaron de manera análoga con el tamaño del

árbol aumentando de 9.2% a 44.2% (Fig. 2). La Bt promedio distribuida en los árboles de *P. piscipula* fue de 60.4%, 36.8% y 2.7% en fuste, ramas y ramillas con hojas, respectivamente.

Ecuaciones alométricas ajustadas

Los parámetros estimados, el error estándar y el nivel de confiabilidad de los estimadores son presentados en la tabla 2, donde se puede observar que, en todos los casos estos estimadores son altamente significativos.

TABLA 1. Estadísticos descriptivos de los árboles derribados de *Piscidia piscipula* en Escárcega, Campeche, México.

Estadístico	Dn (cm)	AT (m)	Bf (kg)	Br (kg)	Bhr (kg)	Bt (kg)
Mínimo	5.70	8.12	8.94	1.10	0.44	9.38
Máximo	55.00	21.00	867.20	597.40	37.00	1501.60
Media	24.59	15.59	272.61	165.34	12.71	450.66
E.E.	3.55	0.91	68.61	44.90	2.44	115.02
C.V. (%)	61.4	24.9	77.2	85.41	81.66	88.48

Dn: diámetro normal; At: altura total; Bf: biomasa del fuste; Br: biomasa de ramas; Bhr: biomasa de hojas y ramillas; Bt: biomasa total aérea; E.E.: error estándar; C.V.: coeficiente de variación.

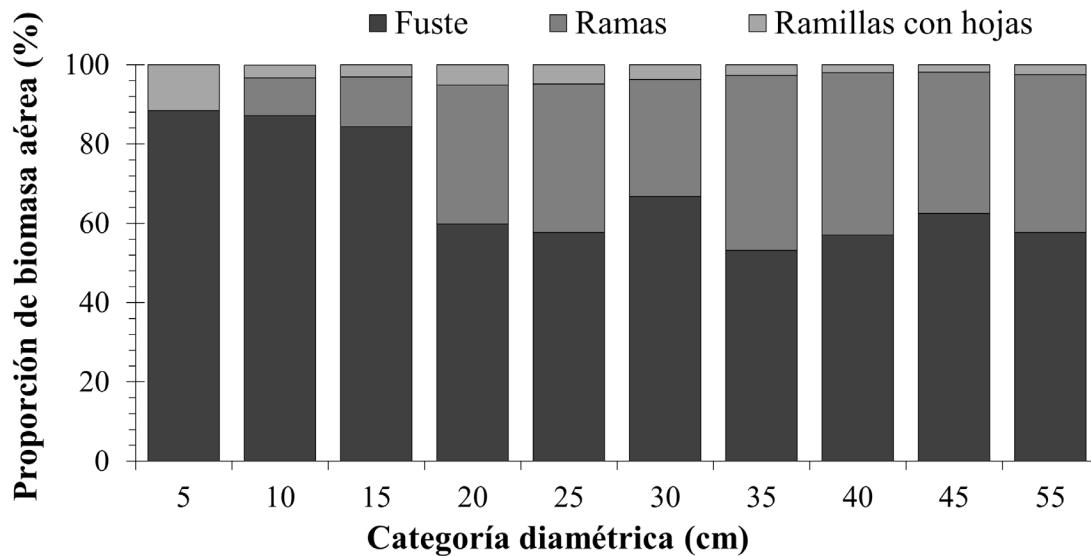


FIGURA 2. Proporción de biomasa área del fuste, ramas y ramillas con hojas en *Piscidia piscipula* en las diferentes categorías diamétricas.



TABLA 2. Parámetros estimados en los dos sistemas de ecuaciones alométricas aditivas para estimar la biomasa de los componentes estructurales de *Piscidia piscipula* en Escárcega, Campeche, México.

<i>Tipo de sistema</i>	<i>Componente del árbol</i>	<i>Par.</i>	<i>Est.</i>	<i>E.E.</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr > t </i>
S_1	Fuste	β_{10}	5.03971	0.5027	10.02	<0.0001
		β_{11}	1.6905	0.0577	29.29	<0.0001
		β_{12}	1.736484	0.1686	10.30	<0.0001
	Ramas	β_{20}	3.90699	0.8168	4.78	0.0003
		β_{21}	2.239099	0.1055	21.22	<0.0001
		β_{22}	0.486697	0.2806	1.73	0.0104
S_2	Fuste	β_{30}	3.85536	1.1646	3.31	0.0052
		β_{31}	1.166141	0.2153	5.42	<0.0001
		β_{32}	0.912641	0.5738	1.59	0.0134
	Ramas	β_{40}	3.45213	0.3257	10.60	<0.0001
		β_{41}	0.943879	0.0303	31.17	<0.0001
		β_{42}	4.00219	0.5310	7.54	<0.0001
S_2	Ramillas con hojas	β_{50}	0.950832	0.0494	19.23	<0.0001
		β_{51}	5.14483	0.2800	4.02	0.0001
		β_{52}	0.790513	0.1186	6.67	<0.0001

Par = parámetros del modelo; Est. = valor de los parámetros estimados; E.E. = error estándar aproximado; S_1 =sistema de ecuaciones aditivas basado en el modelo (1); S_2 = sistema de ecuaciones aditivas basado en el modelo (2).

Las ecuaciones de distribución de biomasa en los dos sistemas presentaron coeficientes de R^2_{adj} superiores a 0.84, siendo los más altos para la biomasa del fuste y ramas y los más bajos para la biomasa de las ramillas con hojas; mientras que para la Bt fueron superiores a 0.99 (Tabla 3). Los resultados de bondad de ajuste indicaron que las ecuaciones alométricas del S_1 presentaron valores más bajos de RMSE (< 27.7 kg), Sx (< 37.2 kg), EMA (< 27.2%) y sesgo (< 0.09 kg) que los obtenidos en el S_2 (Tabla 3).

Las ecuaciones alométricas ajustadas del S_1 que más explicaron la variación en la biomasa fueron para *Bt*, *Bf* y *Br* (> 97 %), y un menor grado para *Brh* (89 %). La capacidad predictiva de las ecuaciones alométricas del S_1 frente a los valores observados manifestó un compor-

tamiento muy aceptable (Fig. 3). Además, los gráficos de dispersión de los residuales contra valores predichos en todas las ecuaciones de biomasa presentaron una tendencia homoscedástica (Fig. 4).

Concentración de carbono por componente

La concentración de carbono se encontró en un intervalo de 47.6% a 54.5% para todos los componentes estructurales. Con base en los cinco árboles analizados para carbono el fuste registró un porcentaje de concentración promedio de 50.6 ± 0.6 , para las ramas 49.3 ± 0.6 y en ramillas con hojas 49.7 ± 1.2 , con una media general del árbol de 49.9 ± 0.4 (Tabla 4).

TABLA 3. Estadísticos de bondad de ajuste de los dos sistemas de ecuaciones alométricas aditivas para estimar la biomasa de los componentes estructurales y total de *Piscidia piscipula* en Escárcega, Campeche, México.

Tipo de sistema	Componente del árbol	R^2_{adj}	RMSE (kg)	Sx (kg)	EMA (%)	SESGO (kg)
S_1	Fuste	0.9911	27.50	30.10	16.26	0.09
	Ramas	0.9789	27.71	30.28	20.05	0.01
	Ramillas con hojas	0.8957	3.35	3.64	2.67	-0.01
	Total	0.9919	23.02	37.18	27.15	0.09
S_2	Fuste	0.9821	39.07	41.77	28.70	-0.36
	Ramas	0.9769	28.99	31.04	22.25	-3.66
	Ramillas con hojas	0.8419	4.12	4.39	3.02	0.12
	Total	0.9931	40.71	40.91	27.32	2.03

R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; Sx = error estándar; EMA = error medio absoluto; S_1 = sistema de ecuaciones aditivas basado en el modelo (1); S_2 = sistema de ecuaciones aditivas basado en el modelo (2).

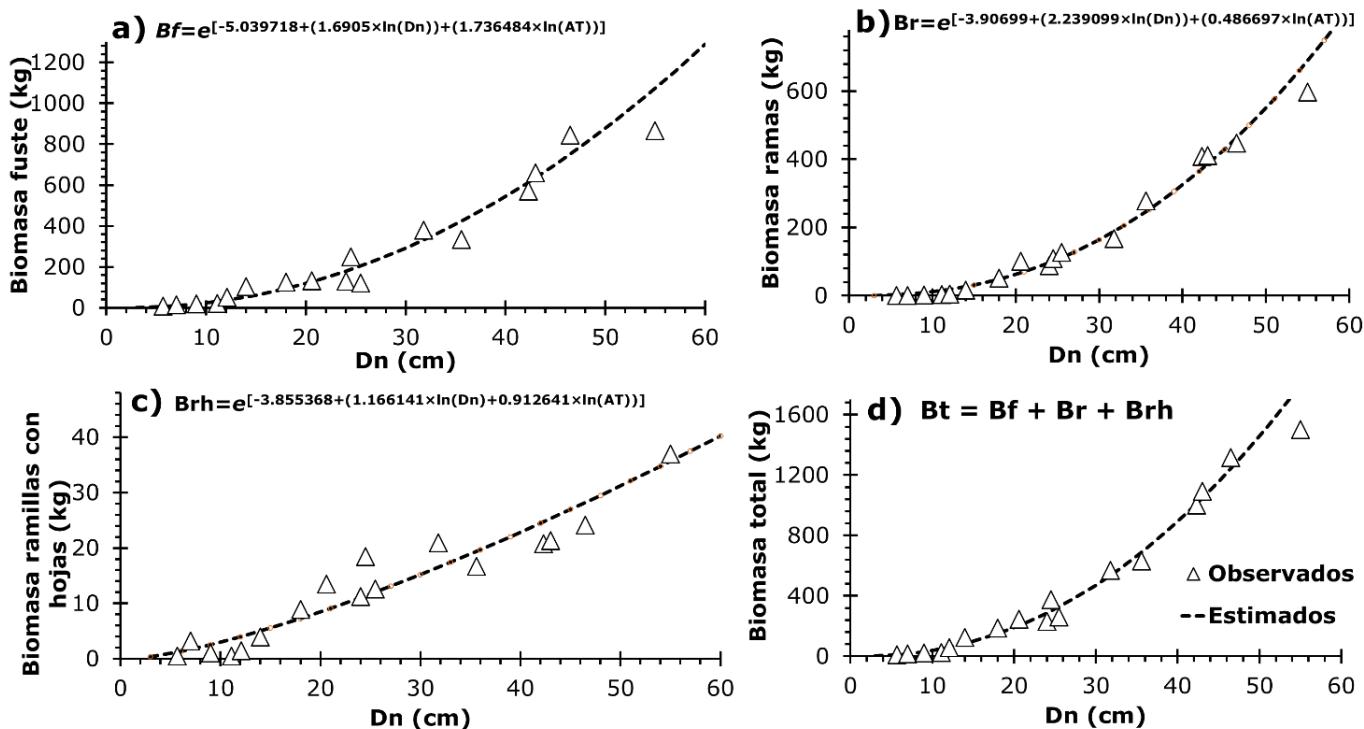


FIGURA 3. Valores observados de a) biomasa del fuste, b) biomasa de ramas, c) biomasa de las ramillas con hojas y d) biomasa total vs las curvas de predicción generadas a partir de las ecuaciones alométricas del S_1 para *Piscidia piscipula* en Escárcega, Campeche, México.

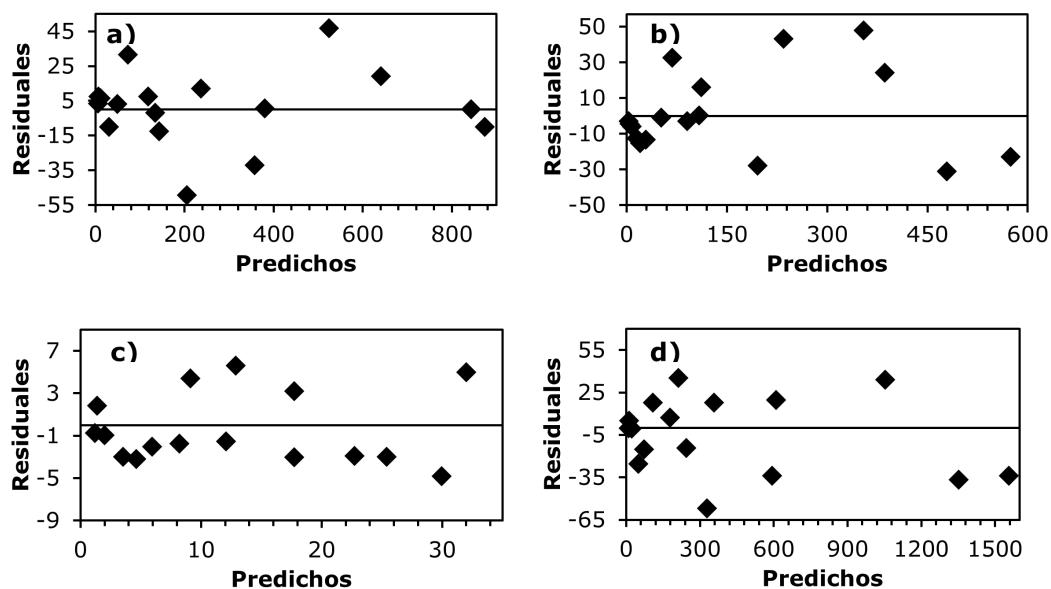


FIGURA 4. Distribución de los residuales frente a los predichos en la biomasa del a) fuste, b) ramas, c) ramillas con hojas y d) total en *Piscidia piscipula*.

TABLA 4. Biomasa, contenido de carbono y concentración de carbono por componentes en los cinco árboles de *Piscidia piscipula* en Escárcega, Campeche, México.

Componentes estructurales	Diámetro normal (cm)					Promedio \pm E.E	
	9.0*	18.0	31.8	42.3	55.0		
Fuste	Biomasa	18.2	126.2	380.5	570.4	867.2	392.5 ± 153.0
	CCC	8.8	65.4	194.1	290.3	442.3	200.2 ± 78.0
	CC	48.1	51.8	51.0	50.9	51.0	50.6 ± 0.6
Ramas	Biomasa	2.1	50.8	167.9	408.8	597.4	245.4 ± 112.6
	CCC	1.0	25.4	84.7	197.0	301.1	121.9 ± 56.1
	CC	47.6	50.0	50.4	48.2	50.4	49.3 ± 0.6
Ramillas con hojas	Biomasa	1.1	8.8	21.0	20.7	37.0	17.7 ± 6.1
	CCC	0.6	4.3	10.1	10.2	17.8	8.6 ± 2.9
	CC	54.5	48.7	48.1	49.2	48.1	49.7 ± 1.2
Biomasa árbol		21.4	185.8	569.4	999.9	1501.6	655.6 ± 270.6
CCC árbol		10.4	95.1	289.0	497.5	761.2	330.6 ± 136.6

E.E.: error estándar; CCC: contenido de carbono por componente (kg por árbol); CC: concentración de carbono (%).

* Valores de 9.0 a 55.0 corresponden al diámetro normal (cm) de los árboles seleccionados para determinar carbono

DISCUSIÓN

En los árboles de *P. piscipula*, la madera del fuste es el principal componente de acumulación de Bt, seguido de las ramas y ramillas con hojas. Este comportamiento de distribución de biomasa promedio fue semejante a los encontrados en otros estudios de distribución de biomasa en especies tropicales; tal es el caso de Henry et al. (2010), quienes indicaron que, en 16 especies arbóreas de un bosque tropical húmedo en Ghana, África, la mayor cantidad de biomasa se concentra en el fuste con 69% y ramas con 27%, y en menor proporción en contrafuertes y follaje con 3% y 1%, respectivamente. De igual forma, Manzano-Méndez et al. (2016) en un estudio de *Zanthoxylum kellermanii* P. Wilson en una selva secundaria de Oaxaca obtuvieron una mayor proporción promedio de biomasa en el fuste (83%) que en ramas (14%) y follaje (3%); y Manzano-Méndez et al. (2017) encontraron valores promedio de 79.6% en el fuste, 13.5% en ramas y 6.7% en follaje para *Vochysia guatemalensis* Donn. Smith. en una selva perennifolia de Oaxaca. Por el contrario, esta distribución relativa de biomasa de los árboles de *P. piscipula* es diferente a los encontrados por Aquino-Ramírez et al. (2015) en *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd. en un bosque tropical subperennifolio en la Sierra Sur de Oaxaca donde el componente estructural que exhibió la más alta fracción de biomasa fueron las ramas con valores de 44% a 55.7%.

El porcentaje de biomasa aérea en cada componente del árbol de *P. piscipula* fue afectado por Dn del árbol (Fig. 2). Tal es el caso de las hojas, donde la proporción de biomasa mostró un comportamiento de disminución con el aumento del Dn, esta tendencia se explica porque, a medida que los árboles crecen, la producción de biomasa foliar en ramas tiende a decrecer por el envejecimiento (Mensah et al., 2016). Por el contrario, el aporte relativo de las ramas a la Bt fue mayor con el incremento del diámetro, lo que indica que los árboles invierten una mayor proporción de biomasa en ramas que la del fuste como una estrategia de crecimiento para competir con los árboles vecinos al crecer en altura y expandir el área de la copa para acceder a

recursos limitantes y sombrear a sus competidores (Mensah et al., 2016; Dimobe et al., 2018).

Los dos sistemas de ecuaciones alométricas generados en este estudio presentaron excelentes estadísticos de ajuste y precisión en las estimaciones de biomasa, debido a que se incluye como variables independientes a la variable combinada del Dn y AT. Distintos autores han demostrado que al incluir la AT como variable predictiva, combinada con el DN en un modelo alométrico de biomasa, mejora la calidad de predicción, especialmente en especies de árboles tropicales (Aquino-Ramírez et al., 2015; Xue et al., 2016; Mensah et al., 2016). El uso de la AT permite tomar en cuenta la variación en Bt entre árboles cuando se tiene el mismo valor de Dn, disminuyendo así los errores de predicción (Picard et al., 2015).

La ecuación de Bt seleccionada en este estudio muestra un excelente ajuste con una $R^2_{adj} = 0.9919$ y cumple la propiedad de aditividad al estimar los componentes de los árboles y la biomasa total a través de un sistema de ecuaciones alométricas como lo sugiere Wang et al. (2018). Estos valores de coeficiente de determinación ajustado son similares a los obtenidos por Cairns et al. (2003), en las diferentes ecuaciones alométricas sin aditividad desarrolladas para estimar biomasa aérea en árboles tropicales en Quintana Roo (R^2_{adj} de 0.91 a 0.98), y al registrado por Ramírez et al. (2017), con un valor de $R^2_{adj} = 0.96$ para la ecuación alométrica de Bt para un grupo de dieciocho especies arbóreas en una selva mediana subcaducifolia en Yucatán.

Las ecuaciones alométricas ajustadas del S₁ para el fuste y ramas explicaron en un alto porcentaje la variabilidad de la biomasa, ya que se obtuvieron coeficientes de regresión ajustada de 99% y 97%, respectivamente; en tanto que para las ramillas con hojas fue de 89%. Estos valores fueron mayores a los obtenidos por Puc-Kauil et al. (2019) para la misma especie (*P. piscipula*) en ecuaciones para ramas ($R^2 = 0.66$) y follaje ($R^2 = 0.70$), pero fue similar a la ecuación del tallo ($R^2 = 0.99$) en individuos de diámetros pequeños (< 10 cm de Dn) en los bosques secundarios del sureste de la Península de Yucatán. El valor bajo del coeficiente de regresión en la ecuación para predecir la biomasa del follaje



también ha sido observado en otras especies de árboles tropicales (Mensah et al., 2017) y se atribuye a la naturaleza efímera de las hojas, así como a los factores internos (por ejemplo, densidad de árboles, microclima, competencia) y externos (por ejemplo, herbivoría, daños por fuego, podas) que afectan el desarrollo de un rodal (Bayen et al., 2020).

El valor obtenido de la concentración de carbono fue muy cercano a 50%, como lo sugiere el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático como factor de conversión respecto a la biomasa (International Panel for Climate Change [IPCC], 2003). En otras especies tropicales se han registrado valores similares, por ejemplo, Elias y Potvin (2003) mencionan porcentajes de 44.4% a 49.4% en 32 especies tropicales de Panamá; Becker et al. (2012), en 23 especies tropicales del Este de África, señalan que una variación de concentración de carbono de 47.5% a 50% con una media de 50%; asimismo, Yeboah et al. (2014) registraron un intervalo de 45.8% a 49.8% en plantaciones de 19 especies de árboles tropicales de 7 años a 12 años en dos ecozonas de Ghana. El contenido de carbono de los árboles de *P. piscipula* se determinó multiplicando la Bt con el coeficiente 0.49. Las ecuaciones alométricas generadas permiten cuantificar de forma confiable la biomasa aérea y el carbono para el sitio de estudio, y potencialmente, pueden ser aplicadas en otros bosques tropicales que muestren características similares en composición de especies y condiciones de crecimiento.

CONCLUSIONES

El sistema de ecuaciones alométricas generado proporciona estimaciones confiables de biomasa que garantizan la aditividad entre los componentes estructurales de *P. piscipula* lo cual permitiría emplearlas en futuros trabajos como la gestión del pago por servicios ambientales sin la necesidad de utilizar procedimientos destructivos. Estas ecuaciones integran al diámetro normal y la altura total como variables predictoras, para cuantificar la biomasa aérea de los bosques tropicales con presencia de *P. piscipula*.

El factor de conversión de biomasa a carbono obtenido (49.9%) fue similar al recomendado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Cli-

mático para estimar el potencial de secuestro de carbono de las masas forestales (50%).

El fuste es el componente estructural del árbol que acumula la mayor cantidad de biomasa y carbono en *P. piscipula*, sin embargo, con el aumento del diámetro normal del árbol la proporción de la biomasa de las ramas se ve favorecida.

REFERENCIAS

- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Castellanos-Bolaños, J. F., de los Santos-Posadas, D., & Etchevers-Barra, J. D. (2015). Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia*, 49(3), 299-314. <https://agrociencia.colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1148>
- Bayen, P., Noulékoun, F., Bognounou, F., Lykke, A. M., Djomo, A., Lamers, J. P., & Thiombiano, A. (2020). Models for estimating aboveground biomass of four dryland woody species in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 180, 104205. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104205>
- Becker, G. S., Braun, D., Gliniars, R., & Dalitz, H. (2012). Relations between wood variables and how they relate to tree size variables of tropical African tree species. *Trees*, 26(4), 1101-1112. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0687-6>
- Behling, A., Pélico, S., Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., Affleck, D. L., Rodrigues, A. L. & Behling, M. (2018). Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2), 1759-1774. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170684>
- Bi, H., Long, Y., Turner, J., Lei, Y., Snowdon, P., Li, Y., Harper, R., Zerihun, A., & Ximenes, F. (2010). Additive prediction of aboveground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. *Forest Ecology and Management*, 259(12), 2301-2314. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.003>
- Bi, H., Murphy, S., Volkova, L., Weston, C., Fairman, T., Li, Y., Law, R., Norris, J., Lei, X., & Caccamo, G. (2015). Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 349(1), 106-121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.007>
- Cairns, M. A., Olmsted, I., Granados, J., & Argaez, J. (2003). Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest ecology and Management*, 186(1-3), 125-132. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00229-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00229-9)

- Cuevas C., J. C., & Aquino, R. M. (2020). Ecuaciones de aditividad para la estimación de biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611821. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611821>
- Dimobe, K., Mensah, S., Goetze, D., Ouédraogo, A., Kuyah, S., Porembski, S., & Thiombiano, A. (2018). Aboveground biomass partitioning and additive models for *Combretum glutinosum* and *Terminalia laxiflora* in West Africa. *Biomass and Bioenergy*, 115, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.022>
- Djomo, A. N., & Chimi, C. D. (2017). Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 391(1), 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.022>
- Echeverría, F., Arreola, J., Esparza, L. G., Morales, V., & López, J. L. (2014). Análisis de la composición y estructura de la selva mediana subperennifolia del Ejido Pachuitz, Hopelchén, Campeche, México. *Forestá Veracruzana*, 16(2), 1-10.
- Eker, M., Poudel, K. P., & Özçelik, R. (2017). Aboveground biomass equations for small trees of brutian pine in Turkey to facilitate harvesting and management. *Forests*, 8(12), 477. <https://doi.org/10.3390/f8120477>
- Elias, M., & Potvin, C. (2003). Assessing inter-and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(6), 1039-1045. <https://doi.org/10.1139/x03-018>
- Etchevers, J. D., Montreal, C. M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., & López, R. M. (2005). *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*. Colegio de Postgraduados.
- Ganamé, M., Bayen, P., Dimobe, K., Ouédraogo, I., & Thiombiano, A. (2020). Aboveground biomass allocation, additive biomass and carbon sequestration models for *Pterocarpus erinaceus* Poir. in Burkina Faso. *Heliyon*, 6(4), e03805. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03805>
- Ganamé, M., Bayen, P., Ouédraogo, I., Balima, L. H., & Thiombiano, A. (2021). Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4(1), 100077. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>
- Gómez-Díaz, J. D., Etchevers-Barra, J. D., Monterrosos-Rivas, A. I., Campo-Alvez, J., & Tinoco-Rueda, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- Greene, W. H. (1999). *Econometric Analysis* (4th ed.). Prentice Hall.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260(8), 1375-1388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040>
- Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. Á., Mas, J. F., Wheeler, C. E., Andres-Mauricio, J., Tun-Dzul, F., George-Chacón, S. P., Reyes-Palomeque, G., Castellanos-Basto, B., Vaca, R., & Dupuy, J. M. (2020). Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon balance and management*, 15(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00151-6>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [Inegi] (2007). *Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1:250 000 serie II. Continuo Nacional Campeche*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235345>
- International Panel for Climate Change [IPCC] (2003). *Good practice guidance for land use, land use change and forestry. The Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC, Japan*. IPCC.
- Manzano-Méndez, F., Valdez Hernández, J. I., López López, M. Á., & Pineda Herrera, E. (2016). Biomasa aérea de *Zanthoxylum kellermanii* P. Wilson en una selva perennifolia del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33), 40-51. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i33.89>
- Manzano-Méndez, F., Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J. I., & López-López, M. Á. (2017). Biomasa aérea de *Vochysia guatemalensis* en una selva alta perennifolia de La Chinantla, Oaxaca. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(11), 395-402. <http://dx.doi.org/10.19136/era.a4n11.1083>
- Martínez-Domínguez, A., Ruiz-Aquino, F., Santiago-García, W., Antúnez, P., López-López, M. Á., Valenzuela-Encinas, C., & Feria-Reyes, R. (2020). Allometric equations to estimate aboveground and belowground biomass of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Forest Science and Technology*, 16(3), 161-170. <https://doi.org/10.1080/21580103.2020.1801526>
- Mensah, S., Glèlè Kakäï, R., & Seifert, T. (2016). Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: the effects of tree size and specific functional traits. *Annals of Forest Research*, 59(1), 49-60. <http://dx.doi.org/10.15287/afr.2016.458>



Mensah, S., Veldtman, R., & Seifert, T. (2017). Allometric models for height and aboveground biomass of dominant tree species in South African Mistbelt forests. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79(1), 19-30. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1225187>

Picard, N., Boyemba Bosela, F., & Rossi, V. (2015). Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Annals of forest Science*, 72(6), 811-823. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0434-9>

Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Food and Agricultural Organization of the United Nations.

Puc-Kauil, R., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Reyes-Hernández, V. J., Dupuy-Rada, J. M., Schneider, L., Pérez-Rodríguez, P., & García-Cuevas, X. (2019). Species-specific biomass equations for small-size tree species in secondary tropical forests. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(3), 735-754. <http://www.revista.ccba.uday.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2961/1332>

Ramírez R., Dupuy R., J. M., Ramírez, A., L., & Solorio S., F. J. (2017). Evaluación de ecuaciones alométricas de biomasa epígea en una selva mediana subcaducifolia de Yucatán. *Madera y Bosques*, 23(2), 163-179. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321452>

Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A., & Fuentes-López, M. E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y bosques*, 20(2), 33-48. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202162>

Statistical Analysis System [SAS] (2002). *The SAS System for Windows version 9.0*. SAS Institute Inc.

Urquiza-Haas, T., Dolman, P. M., & Peres, C. A. (2007). Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management*, 247(1-3), 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.015>

Wang, J., Zhang, L., & Feng, Z. (2018). Allometric equations for the aboveground biomass of five tree species in China using the generalized method of moments. *The Forestry Chronicle*, 94(3), 214-220. <https://doi.org/10.5558/tfc2018-034>

Xiang, W., Zhou, J., Ouyang, S., Zhang, S., Lei, P., Li, J., Deng, X., Fang, X., & Forrester, D. I. (2016). Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China. *European Journal of Forest*

Research, 135(5), 963-979. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0987-2>

Xue, Y., Yang, Z., Wang, X., Lin, Z., Li, D., & Su, S. (2016). Tree biomass allocation and its model Additivity for *Casuarina equisetifolia* in a tropical forest of Hainan Island, China. *PLoS ONE*, 11(3), e0151858. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151858>

Yeboah, D., Burton, A. J., Storer, A. J., & Opuni-Frimpong, E. (2014). Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests*, 45(1), 35-52. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9390-8>

Zamora-Crescencio, P., Flores-Guido, J. S., & Ruenes-Morales, R. (2009). Flora útil y su manejo en el cono sur del estado de Yucatán, México. *Polibotánica*, 28(1), 227-250. <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/798>

Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., Ramírez-Medina, L. N. G., Barrientos-Medina, R. C., Plasencia-Vázquez, A. H., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M. R., & Gutiérrez-Báez, C. (2018). Composición y estructura de la vegetación secundaria en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, 45(1), 57-74. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.5>

Zhang, Q., Wang, C., Wang, X., & Quan, X. (2009). Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecology Management*, 258(5), 722-727. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.009>

Manuscrito recibido el 15 de abril de 2021

Aceptado el 17 de octubre de 2022

Publicado el 17 de diciembre de 2022

Este documento se debe citar como:

Cuevas Cruz, J. C., Aquino Ramírez, M., Kú Chalé, R. C., & Morales Sosa, I. J. (2022). Ecuaciones alométricas aditivas para estimar biomasa aérea y concentración de carbono de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. *Madera y Bosques*, 28(3), e2832356. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832356>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.