

## Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México

### Estimation of above-ground biomass and carbon in temperate forests of southern Mexico

Juan Carlos Guzmán-Santiago<sup>1,5\*</sup> , Héctor Manuel De los Santos-Posadas<sup>1</sup> ,  
Benedicto Vargas-Larreta<sup>2</sup> , Martín Gómez Cárdenas<sup>3,5</sup> , Pablo Marroquín-Morales<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados en Ciencias Forestales. Montecillo Km 36.5, Montecillo, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/Campus El Salto. Mesa del Tecnológico SN, la Forestal. CP. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

<sup>3</sup>Campo experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Avenida Latinoamericana. CP. 47600. Uruapan, Michoacán, México.

<sup>4</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas. Entronque carretera costera y pueblo de Huehuetán. CP. 30660. Huehuetán, Chiapas, México.

<sup>5</sup>Centro de Investigación, Divulgación y Asesoría Técnica Forestal y Agropecuaria (SC). Isabel la Católica. CP. 69800. Tlaxiaco, Oaxaca, México.

\*Autor de correspondencia: guzmansa.forest22@gmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 31 de octubre 2023

Aceptado: 13 de mayo 2024

**RESUMEN.** Los inventarios forestales son herramientas que permiten la recolección y registro de información para la estimación del volumen y la biomasa con la finalidad de determinar la retención del carbono en la biomasa forestal mediante técnicas de regresión. El objetivo del estudio fue generar parámetros de ecuaciones alométricas que estimen de forma precisa la biomasa y el contenido de carbono total aéreo de 25 especies de clima templado de la UMAFOR 2012 en San Juan Quiahije, Oaxaca. Se establecieron sitios circulares de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, donde se tomó el diámetro normal y la altura total de 16 863 árboles de 25 especies; posteriormente se estimó la biomasa y el contenido de carbono aéreo a través las ecuaciones alométricas, mediante el Software SAS. La ecuación potencial simultánea fue la que presentó la mejor bondad de ajuste, donde el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) fue superior a 87% para la biomasa total, mientras que en la estimación del carbono total se obtuvo un  $R^2_{adj}$  de 99% para todas las especies. El género *Pinus* presentó mayor proporción en los compartimentos, destacando *Pinus maximinoi* con el mayor promedio en biomasa (35 971.85 y 2 922.03 kg) y contenido de carbono (17 985.92 y 1 462.01 kg) en ramas y fuste, respectivamente.

**Palabras clave:** Biomasa, contenido de carbono, diámetro, altura, inventario forestal.

**ABSTRACT.** Forest inventories are tools that allow the collection and recording of information for the estimation of volume and biomass in order to determine carbon sequestration in forest biomass using regression techniques. The objective of the study was to generate allometric equation parameters that accurately estimate the biomass and total aboveground carbon content of 25 temperate species from UMAFOR 2012, San Juan Quiahije, Oaxaca. Circular sampling sites of 1000 m<sup>2</sup> were established, where the normal diameter and total height of 16 863 trees of 25 species were taken; subsequently, biomass and aboveground carbon content were estimated through allometric equations, using SAS software. The simultaneous potential equation had the best goodness of fit, where the adjusted coefficient of determination ( $R^2_{adj}$ ) was over 87% for total biomass, while the total carbon estimate had an  $R^2_{adj}$  of 99% for all species. *Pinus maximinoi* had the highest average biomass (35 971.85 and 2 922.03 kg) and carbon content (17 985.92 and 1 462.01 kg) in branches and stems, respectively.

**Keywords:** Biomass, carbon content, diameter, height, forest inventory.

**Como citar:** Guzmán-Santiago JC, De los Santos-Posadas HM, Vargas-Larreta B, Gómez Cárdenas M, Marroquín-Morales P (2024) Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3934. DOI: 10.19136/era.a11n2.3934.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales bajo manejo sustentable brindan bienes (sociales y económicos, entre otros) y servicios, sobre todo la capacidad para la captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CO<sub>2</sub> absorbido en la biomasa vegetal por medio de la fotosíntesis y en el suelo por medio de la materia orgánica; ayuda a mitigar el problema del calentamiento global (Harris *et al.* 2021). La biomasa en el bosque permite cuantificar el carbono almacenado que existe en un área determinada, o bien, la cantidad que se libera a la atmósfera mediante el proceso de combustión (Cuevas-Cruz y Aquino-Ramírez 2020).

La biomasa forestal es el peso verde y seco de la materia orgánica del ecosistema por encima (biomasa aérea) y por debajo del suelo (subterráneo), y normalmente es un indicador de la productividad, que se cuantifica en toneladas por hectárea de peso seco (Wu y Xu 2023). Los métodos más utilizados en la estimación de la biomasa aérea son las ecuaciones alométricas, ya que se consideran confiables para cuantificar la biomasa del bosque, como la suma de la materia seca de árboles individuales (Ganamé *et al.* 2021). Estas ecuaciones se basadas en el análisis de regresión lineal y no lineal en forma individual, con variables fáciles de medir como el diámetro y la altura (Navarro *et al.* 2020).

A pesar, de que autores como Vargas-Larreta *et al.* (2017a) han desarrollado en México diversas ecuaciones biométricas para 97 especies de clima templado y tropicales, aún falta por incluir más información relevante, como la biomasa aérea. Por lo tanto, esta investigación aporta información nueva sobre la estimación de biomasa y contenido de carbono para las especies de mayor importancia económica para la zona de estudio, donde no se ha generado ninguna ecuación de este tipo. El objetivo del estudio fue generar parámetros de ecuaciones alométricas que estimen de forma precisa la biomasa y el contenido de carbono total aéreo de 25 especies de clima templado de la UMAFOR 2012 en San Juan Quiahije, Oaxaca.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de San Juan Quiahije, localizado al suroeste del estado de Oaxaca; pertenece a la región Costa y de acuerdo con el Registro Agrario Nacional (RAN), posee una extensión territorial de 24 914 hectáreas. Se ubica dentro de las coordenadas extremas 16° 17' 46" a 16° 21' 33" LN y 97° 17' 54" a 97° 25' 53" LO, con altitud de 680 a 1 970 m. Limita al norte con los municipios de Santiago Minas y Santa Cruz Zenzontepec; al sur con Santa Catarina Juquila y San Miguel Panixtlahuca, al este con Santa Catarina Juquila y al oeste con Tataltepec de Valdés (INEGI 2023a). De acuerdo con información ambiental del INEGI (2023b), la orografía en el área de trabajo es accidentada con pendientes elevadas de 15 al 60%.

### Obtención de los datos

Los datos fueron recolectados en la Unidad de Manejo Forestal Regional (UMAFOR) 2012, donde se establecieron 450 sitios circulares de 1 000 m<sup>2</sup>, distribuidos al azar en una superficie de 3 043.09 ha<sup>-1</sup>, correspondientes a 138 unidades mínimas de manejo (UM), con radios diferentes

en función de la pendiente de los sitios y de acuerdo con lo recomendado en el manual del Sistema de Planeación Forestal de Bosque Templado (SiPlaFor 2015). La muestra total fue de 16 863 árboles correspondientes a 25 especies; en cada sitio se midió la altura y el diámetro de los árboles mayores o iguales a 7.5 cm de diámetro normal ( $dn$ , cm); la altura total ( $at$ , m) se midió con una pistola Haga® y el  $dn$  con una cinta diamétrica alemana de Forestry Suppliers, Inc.

### Análisis y procesamiento de los datos

La biomasa se obtuvo a partir de los valores de la densidad básica de la madera reportadas en diferentes fuentes (Sotomayor 2005, Ordóñez-Díaz et al. 2015). Se utilizó el valor 0.50 de la concentración del carbono para el cálculo del contenido de este, el cual es recomendado para hojosas y coníferas cuando no se tiene disponibles datos de contenido de carbono de las especies (IPCC 2005, Graciano-Ávila et al. 2019).

### Ecuaciones utilizadas

Se ajustaron tres ecuaciones no lineales para estimar la biomasa fustal y una lineal para estimar la biomasa de ramas ( $Br$ ); así como para estimar el contenido de carbono, donde las variables independientes fueron diámetro normal y altura total (Tabla 1).

**Tabla 1.** Ecuaciones utilizadas para la estimación de biomasa.

Estructura	Tipo	Referencias	Ecuaciones
$Bf = \alpha_0 * dn^{\alpha_1} * at^{\alpha_2}$	No lineal	Schumacher y Hall (1933)	1
$Bf = \alpha_0 * (dn^{\alpha_1})$	No lineal	Zhang et al. (2017)	2
$Bf = \alpha_0 * (dn * at)^{\alpha_1}$	No lineal	Ter-Mikaelian and Korzukhin (1997)	3
$Br = \beta_0 * dn^2$	Lineal		4

$Bf$  = biomasa fustal,  $dn$  = diámetro normal (cm),  $at$  = altura total (m),  $\alpha_i$  y  $\beta_0$  = parámetros estimados. Nota: La ecuación 4, hace referencia en la estimación de las ramas de cada árbol de cada especie.

### Método de ajuste y selección de las ecuaciones

Se realizó un ajuste simultáneo para estimar la biomasa aérea total de los árboles (Biomasa fustal + Biomasa de ramas = biomasa total) de cada especie, para garantizar la aditividad (Cuevas-Cruz et al. 2022). Posteriormente, se estimó la concentración del carbono para los diferentes componentes de cada árbol por especie (siguiendo el mismo procedimiento que para la estimación de la biomasa). Para esto, se utilizó el método de regresión iterativa aparentemente no relacionada (Iterated Seemingly Unrelated Regression, ITSUR) para garantizar la compatibilidad de las estimaciones, mediante el procedimiento PROC MODEL del software Statistical Analysis Systems (SAS 2009).

Para elegir el mejor modelo se consideraron los valores del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ), así como la raíz del error medio cuadrático (REMC) que debe aproximarse a cero y el CIB (criterio de información bayesiano), que considera el menor valor como la mejor de la ecuación.

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \times \left[ \frac{n - 1}{n - p - 1} \right]$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}}$$

$$CIB = n * \ln \left[ \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p} \right] + p * \ln(n)$$

p: número de parámetros a estimar. n: tamaño de muestra.  $Y_i$ : valores observados.  $\hat{Y}_i$ : valores estimados.  $R^2$ : coeficiente de determinación. Ln: logaritmo natural.

La selección del mejor modelo se complementó con un análisis gráfico de las estimaciones y los residuos, ya que es una opción que permite demostrar el comportamiento de los datos (Diéguez-Aranda et al. 2005).

### Corrección de la heterocedasticidad

Los datos de biomasa normalmente presentan problemas de heterocedasticidad, o falta de homogeneidad de varianzas de los errores, debido a que árboles de mayores dimensiones presentan mayor variación en su estimación. Este problema se corrigió para garantizar estimaciones de biomasa más robusta y precisa. La varianza  $\sigma_i^2$ , que es desconocida, se estimó con una función exponencial  $\sigma_i^2 = \gamma D^K$ . Los valores de  $\gamma$  y del exponente  $K$  se optimizaron siguiendo la metodología propuesta por Harvey (1976), la cual emplea los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error.

## RESULTADOS

### Biomasa total de las especies

Las ecuaciones se ajustaron de manera simultánea (biomasa de fuste + biomasa de ramas), destacando las ecuaciones 2 y 4, como las más idóneas para describir los datos de biomasa total de las especies evaluadas. Todos los parámetros fueron significativos ( $P < 0.05$ ) en cada componente. De manera general, se encontraron valores de coeficientes de determinación ajustado  $R^2_{adj}$  de 75 a 99% y raíz del error medio cuadrático (REMC) de 7.10 a 126.88 kg para la biomasa de fuste (BF); además, los valores del criterio de información bayesiano ( $CIB = 126.52$  al 50 072.11) respaldaron la capacidad predictiva de las ecuaciones. Para la biomasa de ramas (BR) se obtuvieron, en todos los casos, valores aceptables de los estadísticos de bondad de ajuste utilizados ( $R^2_{adj}$ , REMC y CIB). De lo anterior, se observa que en la biomasa total (BT) la ecuación presentó valores de bondad de ajuste satisfactorios, que explican de manera congruente los datos de biomasa de las especies, al tener valores de  $R^2_{adj}$  que oscilaron entre 87 y 99% (Tabla 2).

El análisis estadístico demostró que las especies del género *Pinus* presentan los valores más altos de biomasa total, destacando *Pinus maximinoi* (35 971.85 + 2 922.03 kg), seguida por *P. oocarpa* (24 704.58 + 2010.62 kg) y *P. douglasiana* (11 970.16 + 923.59 kg). En contraste, con *P. devoniana* (94.81 + 18.58 kg) y *P. lawsonii* (78.00 + 7.13 kg) presentaron valores de biomasa total más bajos.

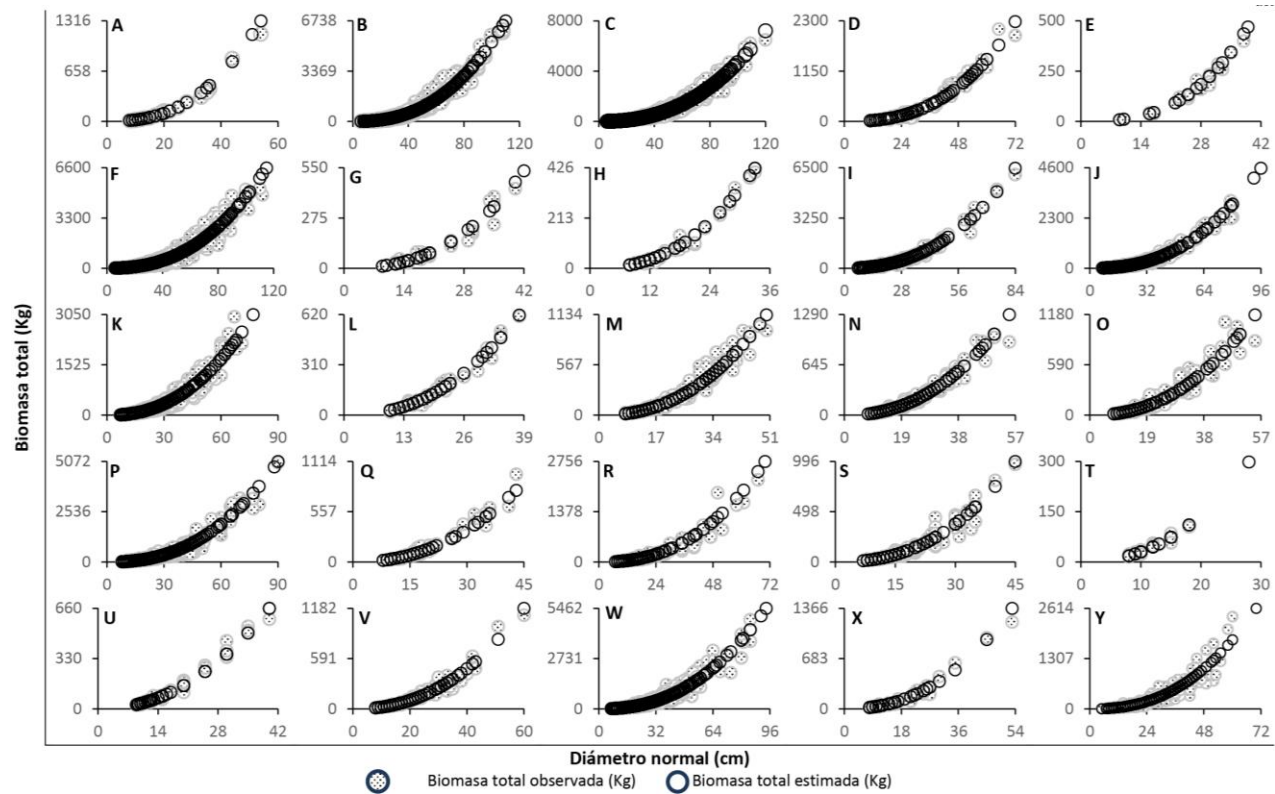
**Tabla 2.** Estadísticos y bondad de ajustes de la ecuación de Zhang *et al.* (2017) para biomasa.

Sp	n	Estimadores						Error estándar									Bondad de ajuste					
		Biomasa fustal			Biomasa de ramas			Biomasa total			Biomasa fustal			Biomasa de ramas			Biomasa total					
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC						
A	47	0.0422	2.5796	0.0246	0.0025	0.0153	1.32x10 <sup>-19</sup>	41.14	0.99	355.24	7.41x10 <sup>-16</sup>	0.99	-3,270.00	41.60	0.99	335.71						
B	1535	0.0462	2.5191	0.0266	0.0009	0.0049	4.38x10 <sup>-20</sup>	126.88	0.97	14878.00	4.00x10 <sup>-15</sup>	0.99	-10,177.58	126.92	0.97	5,366.08						
C	5540	0.0638	2.4196	0.0253	0.0006	0.0025	2.08x10 <sup>-20</sup>	91.67	0.97	50072.11	2.79x10 <sup>-15</sup>	0.99	-37,130.02	91.68	0.97	128.67						
D	79	0.0255	2.6545	0.0221	0.0032	0.0327	1.40x10 <sup>-19</sup>	88.66	0.96	714.96	1.80x10 <sup>-15</sup>	0.99	-5,358.48	89.24	0.96	294.92						
E	19	0.0112	2.8925	0.0143	0.0020	0.0509	3.23x10 <sup>-19</sup>	24.51	0.96	126.52	1.19x10 <sup>-15</sup>	0.99	-1,301.92	25.27	0.96	14,880.01						
F	4105	0.0506	2.4713	0.0242	0.0008	0.0043	3.22x10 <sup>-20</sup>	120.27	0.94	39333.89	3.00x10 <sup>-15</sup>	0.99	-27,453.60	120.28	0.94	222.35						
G	43	0.0277	2.6019	0.0394	0.0074	0.0795	0.00174	28.17	0.93	292.85	1.00x10 <sup>-10</sup>	0.99	-1000.01	28.52	0.95	50,074.11						
H	39	0.0682	2.4772	0.0272	0.0069	0.0313	3.49x10 <sup>-19</sup>	15.67	0.98	220.28	6.72x10 <sup>-16</sup>	0.99	-2,720.37	15.88	0.98	717.00						
I	280	0.1576	2.3814	0.0619	0.0072	0.0119	2.15x10 <sup>-19</sup>	99.14	0.98	2581.70	3.56x10 <sup>-15</sup>	0.99	-18,624.16	99.32	0.98	39,335.89						
J	492	0.0503	2.4851	0.0363	0.0020	0.0100	1.13x10 <sup>-19</sup>	88.49	0.97	4419.37	3.74x10 <sup>-15</sup>	0.99	-32,679.70	88.58	0.97	2,583.71						
K	862	0.0648	2.4206	0.1116	0.0028	0.0119	2.88x10 <sup>-19</sup>	89.26	0.90	7752.18	1.01x10 <sup>-14</sup>	0.99	-55,553.34	89.31	0.94	357.30						
L	39	0.0748	2.3994	0.1082	0.0133	0.0531	7.02x10 <sup>-19</sup>	24.00	0.95	253.56	2.02x10 <sup>-15</sup>	0.99	-2,634.63	24.33	0.97	4,421.37						
M	216	0.0572	2.4398	0.1336	0.0052	0.0279	9.55x10 <sup>-19</sup>	54.68	0.85	1736.03	1.10x10 <sup>-14</sup>	0.99	-13,879.08	54.81	0.93	7,754.18						
N	145	0.0800	2.3378	0.1167	0.0079	0.0296	8.21x10 <sup>-19</sup>	59.74	0.88	1193.07	7.51x10 <sup>-15</sup>	0.99	-9,425.49	59.95	0.94	255.63						
O	190	0.0691	2.3507	0.1073	0.0081	0.0351	6.73x10 <sup>-19</sup>	70.25	0.75	1623.01	7.94x10 <sup>-15</sup>	0.99	-12,331.27	70.43	0.87	1,738.04						
P	600	0.0494	2.5177	0.1184	0.0025	0.0134	9.11x10 <sup>-19</sup>	125.25	0.92	5804.73	1.59x10 <sup>-15</sup>	0.99	-40,882.54	125.35	0.95	1,195.09						
Q	58	0.0960	2.3133	0.1184	0.0126	0.0377	4.46x10 <sup>-19</sup>	46.55	0.94	451.55	1.63x10 <sup>-15</sup>	0.99	-3,944.76	46.97	0.97	1,625.03						
R	212	0.0441	2.5406	0.1234	0.0042	0.0276	6.52x10 <sup>-19</sup>	121.77	0.81	2043.47	1.03x10 <sup>-14</sup>	0.99	-13,648.01	122.06	0.89	5,806.74						
S	114	0.0487	2.5348	0.1184	0.0060	0.0365	1.44x10 <sup>-19</sup>	49.77	0.89	897.63	6.68x10 <sup>-16</sup>	0.99	-7,960.95	49.99	0.94	453.60						
T	31	0.0805	2.3528	0.1201	0.0111	0.0451	2.00x10 <sup>-15</sup>	7.30	0.96	128.69	2.42x10 <sup>-12</sup>	0.99	-1,653.78	7.43	0.98	2,045.48						
U	85	0.1654	2.1557	0.1184	0.0132	0.0255	2.06x10 <sup>-19</sup>	21.08	0.95	524.63	3.36x10 <sup>-16</sup>	0.99	-6,051.71	21.20	0.97	899.65						
V	102	0.0600	2.3474	0.0790	0.0049	0.0245	7.06x10 <sup>-19</sup>	39.04	0.91	754.18	3.99x10 <sup>-15</sup>	0.99	-6,757.81	39.23	0.95	130.77						
W	1372	0.0682	2.4429	0.1082	0.0018	0.0074	1.03x10 <sup>-19</sup>	101.02	0.92	12673.79	3.74x10 <sup>-15</sup>	0.99	-91,148.74	101.06	0.95	526.66						
X	44	0.0964	2.3498	0.0989	0.0115	0.0337	1.05x10 <sup>-19</sup>	41.50	0.96	333.65	8.67x10 <sup>-15</sup>	0.99	-2,844.57	42.01	0.97	756.20						
Y	614	0.0680	2.4687	0.0355	0.0039	0.0163	6.97x10 <sup>-20</sup>	78.36	0.88	5364.08	8.25x10 <sup>-16</sup>	0.99	-42,642.29	78.42	0.90	12,675.79						

Sp: especie. n: número de muestras. A: *Pinus pseudostrobus*. B: *Pinus douglasiana*. C: *Pinus maximinoi*. D: *Pinus montezumae*. E: *Pinus ayacahuite*. F: *Pinus oocarpa*. G: *Pinus devoniana*. H: *Pinus lawsonii*. I: *Pinus pringlei*. J: *Pinus teocote*. K: *Quercus acutifolia*. L: *Quercus candicans*. M: *Quercus castanea*. N: *Quercus conspersa*. O: *Quercus crassifolia*. P: *Quercus elliptica*. Q: *Quercus frutex*. R: *Quercus laeta*. S: *Quercus magnoliifolia*. T: *Quercus martinezii*. U: *Quercus ocoteifolia*. V: *Quercus rugosa*. W: *Quercus scytophylla*. X: *Arbutus xalapensis*. Y: *Clethra mexicana*. \*Nota: el parámetro a<sub>0</sub> es el único que tuvo un valor Pr > |t| de 0.0006 en *Pinus devoniana*, el resto de los parámetros fueron altamente significativos con Pr > |t| de 0.0001.

En lo que respecta al género *Quercus*, se encontró mayor biomasa en *Quercus scytophylla* (5 190.29 + 1 734.01 kg), seguido de *Q. acutifolia*, con valores de 3 139.87 + 1 226.20 kg, y *Q. elliptica*, con 3 024.33+1 088.39 kg. Por otra parte, *Quercus martinezii* registró los valores más bajos (22.68 + 13.14 kg), muy similares a los obtenidos para *Clethra mexicana* (1 592.77 + 176.24 kg) y *Arbutus xalapensis* (114.89 + 37.03 kg). En todos los casos, las ecuaciones fueron capaces de describir de manera congruente el conjunto de datos en las diferentes categorías diamétricas, aunque se observaron ligeras desviaciones de los valores estimados respecto a los observados para

diámetros de 20 cm en adelante para algunas especies como *Pinus oocarpa*, *Quercus castanea* Q. *crassifolia*, *Q. magnoliifolia*, *Q. scytophylla* y *Clethra mexicana* (Figura 1).



**Figura 1.** Biomasa total observada vs estimada, donde: A: *Pinus pseudostrobus*. B: *Pinus douglasiana*. C: *Pinus maximinoi*. D: *Pinus montezumae*. E: *Pinus ayacahuite*. F: *Pinus oocarpa*. G: *Pinus devoniana*. H: *Pinus lawsonii*. I: *Pinus pringlei*. J: *Pinus teocote*. K: *Quercus acutifolia*. L: *Quercus candicans*. M: *Quercus castanea*. N: *Quercus conspersa*. O: *Quercus crassifolia*. P: *Quercus elliptica*. Q: *Quercus frutex*. R: *Quercus laeta*. S: *Quercus magnoliifolia*. T: *Quercus martinezii*. U: *Quercus ocoteifolia*. V: *Quercus rugosa*. W: *Quercus scytophylla*. X: *Arbutus xalapensis*. Y: *Clethra mexicana*.

### Contenido de carbono total

La ecuación seleccionada, por presentar la mejor bondad de ajuste para cada especie, en este caso los coeficientes de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) mayores al 99%, así como REMC menores a “cero”, y por ende, al ser significativos todos sus parámetros ( $P < 0.05$ , Tabla 3). En este sentido, se observa que el valor del intercepto cambió para todas las especies, lo cual es correcto ya que se espera que un árbol con diámetro cero, tendría un valor de cero de carbono, y esta misma perspectiva aplica para el parámetro asociado a las ramas, dando que se ajustaron de manera simultánea y, en consecuencia, se refleja también en los valores de bondad de ajuste.

**Tabla 3.** Estadísticos y bondad de ajustes de la ecuación de Zhang *et al.* (2017) para el contenido de carbono total.

Sp	n	Estimadores			Error estándar			Bondad de ajuste								
								Contenido de carbono fustal			Contenido de carbono de ramas			Contenido de carbono total		
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC	REMC	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	BIC
A	47	0.021	2.579	0.012	7.7x10 <sup>-13</sup>	9.2x10 <sup>-12</sup>	6.2x10 <sup>-20</sup>	1.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1713.5	3.7x10 <sup>-16</sup>	0.99	-3337.0	1.7x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1565.8
B	1535	0.023	2.519	0.013	4.6x10 <sup>-13</sup>	5.0x10 <sup>-12</sup>	2.1x10 <sup>-20</sup>	6.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-51026.1	2.0x10 <sup>-15</sup>	0.99	-10396.8	1.2x10 <sup>-8</sup>	0.99	-22409.0
C	5540	0.031	2.419	0.012	3.2x10 <sup>-13</sup>	2.5x10 <sup>-12</sup>	1.0x10 <sup>-20</sup>	3.3x10 <sup>-8</sup>	0.99	-19058.2	1.4x10 <sup>-15</sup>	0.99	-37891.7	2.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-667.3
D	79	0.012	2.654	0.011	8.8x10 <sup>-13</sup>	1.9x10 <sup>-12</sup>	6.9x10 <sup>-20</sup>	4.3x10 <sup>-8</sup>	0.99	-2673.3	9.0x10 <sup>-16</sup>	0.99	-5470.3	9.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1578.0
E	19	0.005	2.892	0.007	7.2x10 <sup>-13</sup>	3.9x10 <sup>-11</sup>	9.7x10 <sup>-20</sup>	1.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-669.4	3.3x10 <sup>-16</sup>	0.99	-1351.4	6.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-51012.5
F	4105	0.025	2.471	0.012	2.5x10 <sup>-13</sup>	2.7x10 <sup>-12</sup>	1.6x10 <sup>-20</sup>	4.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-13964.8	1.5x10 <sup>-15</sup>	0.99	-28022.6	8.3x10 <sup>-9</sup>	0.99	-1445.0
G	43	0.013	2.601	0.019	2.0x10 <sup>-13</sup>	4.3x10 <sup>-11</sup>	1.4x10 <sup>-12</sup>	7.7x10 <sup>-9</sup>	0.99	-1600.6	1.0x10 <sup>-10</sup>	0.99	-1000.0	3.5x10 <sup>-8</sup>	0.99	-19019.7
H	39	0.034	2.477	0.013	3.3x10 <sup>-12</sup>	3.1x10 <sup>-11</sup>	1.7x10 <sup>-19</sup>	8.1x10 <sup>-9</sup>	0.99	-1447.1	3.3x10 <sup>-16</sup>	0.99	-2776.1	4.3x10 <sup>-8</sup>	0.99	-2671.3
I	280	0.078	2.381	0.031	2.4x10 <sup>-12</sup>	8.3x10 <sup>-12</sup>	1.0x10 <sup>-19</sup>	3.4x10 <sup>-8</sup>	0.99	-9608.9	1.7x10 <sup>-15</sup>	0.99	-19015.9	4.2x10 <sup>-8</sup>	0.99	-13943.4
J	492	0.025	2.485	0.018	8.8x10 <sup>-13</sup>	9.0x10 <sup>-12</sup>	5.6x10 <sup>-20</sup>	3.66x10 <sup>-8</sup>	0.99	-16841.2	1.8x10 <sup>-15</sup>	0.99	-33365.9	3.5x10 <sup>-8</sup>	0.99	-9604.1
K	862	0.032	2.420	0.055	9.0x10 <sup>-13</sup>	7.5x10 <sup>-12</sup>	5.6x10 <sup>-14</sup>	1.45x10 <sup>-8</sup>	0.99	-31108.6	1.7x10 <sup>-9</sup>	0.99	-34807.8	1.2x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1711.5
L	39	0.037	2.399	0.054	5.9x10 <sup>-12</sup>	4.9x10 <sup>-11</sup>	3.5x10 <sup>-19</sup>	8.6x10 <sup>-9</sup>	0.99	-1442.5	1.0x10 <sup>-15</sup>	0.99	-2690.3	3.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-16778.5
M	216	0.028	2.439	0.066	2.6x10 <sup>-12</sup>	2.6x10 <sup>-11</sup>	4.7x10 <sup>-19</sup>	1.4x10 <sup>-8</sup>	0.99	-7802.9	5.4x10 <sup>-15</sup>	0.99	-14181.8	2.6x10 <sup>-8</sup>	0.99	-30112.2
N	145	0.040	2.337	0.058	3.5x10 <sup>-12</sup>	2.5x10 <sup>-11</sup>	4.0x10 <sup>-19</sup>	1.4x10 <sup>-8</sup>	0.99	-5221.8	3.7x10 <sup>-15</sup>	0.99	-9629.4	1.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1429.2
O	190	0.034	2.350	0.053	3.1x10 <sup>-12</sup>	2.6x10 <sup>-11</sup>	3.3x10 <sup>-19</sup>	1.4x10 <sup>-8</sup>	0.99	-6846.8	3.9x10 <sup>-15</sup>	0.99	-12597.9	1.8x10 <sup>-8</sup>	0.99	-7690.1
P	600	0.024	2.517	0.059	9.0x10 <sup>-13</sup>	9.4x10 <sup>-12</sup>	4.5x10 <sup>-20</sup>	2.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-20812.2	7.9x10 <sup>-16</sup>	0.99	-41718.7	1.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-5151.0
Q	58	0.048	2.313	0.059	6.5x10 <sup>-12</sup>	3.8x10 <sup>-11</sup>	2.2x10 <sup>-19</sup>	1.5x10 <sup>-8</sup>	0.99	-2081.0	8.1x10 <sup>-16</sup>	0.99	-4027.2	1.5x10 <sup>-8</sup>	0.99	-6832.0
R	212	0.022	2.540	0.061	1.7x10 <sup>-12</sup>	2.1x10 <sup>-11</sup>	3.3x10 <sup>-19</sup>	2.8x10 <sup>-8</sup>	0.99	-7362.9	5.1x10 <sup>-16</sup>	0.99	-13945.2	4.8x10 <sup>-8</sup>	0.99	-20202.5
S	114	0.024	2.534	0.059	2.4x10 <sup>-12</sup>	2.9x10 <sup>-11</sup>	7.2x10 <sup>-20</sup>	1.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-4164.2	3.3x10 <sup>-16</sup>	0.99	-8121.7	1.8x10 <sup>-8</sup>	0.99	-2062.4
T	31	0.040	2.352	0.060	2.5x10 <sup>-12</sup>	2.2x10 <sup>-11</sup>	1.2x10 <sup>-18</sup>	1.3x10 <sup>-9</sup>	0.99	-1262.3	1.6x10 <sup>-15</sup>	0.99	-2109.0	5.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-7117.7
U	85	0.082	2.155	0.059	9.9x10 <sup>-12</sup>	3.9x10 <sup>-11</sup>	1.0x10 <sup>-19</sup>	1.3x10 <sup>-8</sup>	0.99	-3070.6	1.6x10 <sup>-16</sup>	0.99	-6171.9	1.6x10 <sup>-8</sup>	0.99	-4082.6
V	102	0.030	2.347	0.039	3.0x10 <sup>-12</sup>	2.9x10 <sup>-11</sup>	3.5x10 <sup>-19</sup>	1.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-3750.1	2.0x10 <sup>-15</sup>	0.99	-6901.8	3.0x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1210.9
W	1372	0.034	2.442	0.054	7.8x10 <sup>-13</sup>	6.2x10 <sup>-12</sup>	5.1x10 <sup>-20</sup>	2.9x10 <sup>-8</sup>	0.99	-47584.2	1.8x10 <sup>-15</sup>	0.99	-93055.9	1.7x10 <sup>-8</sup>	0.99	-3032.5
X	44	0.048	2.349	0.049	5.8x10 <sup>-12</sup>	3.4x10 <sup>-11</sup>	6.2x10 <sup>-19</sup>	1.2x10 <sup>-8</sup>	0.99	-1592.5	4.3x10 <sup>-15</sup>	0.99	-2907.3	1.3x10 <sup>-8</sup>	0.99	-3690.8
Y	614	0.034	2.468	0.017	7.1x10 <sup>-13</sup>	5.8x10 <sup>-12</sup>	3.3x10 <sup>-20</sup>	1.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-22411.0	4.1x10 <sup>-16</sup>	0.99	-43497.8	3.1x10 <sup>-8</sup>	0.99	-47440.4

Sp: especies. n: número de muestras. A: *Pinus pseudostrobus*. B: *Pinus douglasiana*. C: *Pinus maximinoi*. D: *Pinus montezumae*. E: *Pinus ayacahuite*. F: *Pinus oocarpa*. G: *Pinus devoniana*, H: *Pinus lawsonii*. I: *Pinus pringlei*. J: *Pinus teocote*. K: *Quercus acutifolia*. L: *Quercus candicans*. M: *Quercus castanea*. N: *Quercus conspersa*. O: *Quercus crassifolia*. P: *Quercus elliptica*. Q: *Quercus frutex*. R: *Quercus laeta*. S: *Quercus magnoliifolia*. T: *Quercus martinezii*. U: *Quercus ocoteifolia*. V: *Quercus rugosa*. W: *Quercus scytophylla*. X: *Arbutus xalapensis*. Y: *Clethra mexicana*. \*Nota: todos los valores de los parámetros fueron altamente significativos con  $Pr > |t|$  de 0.0001.

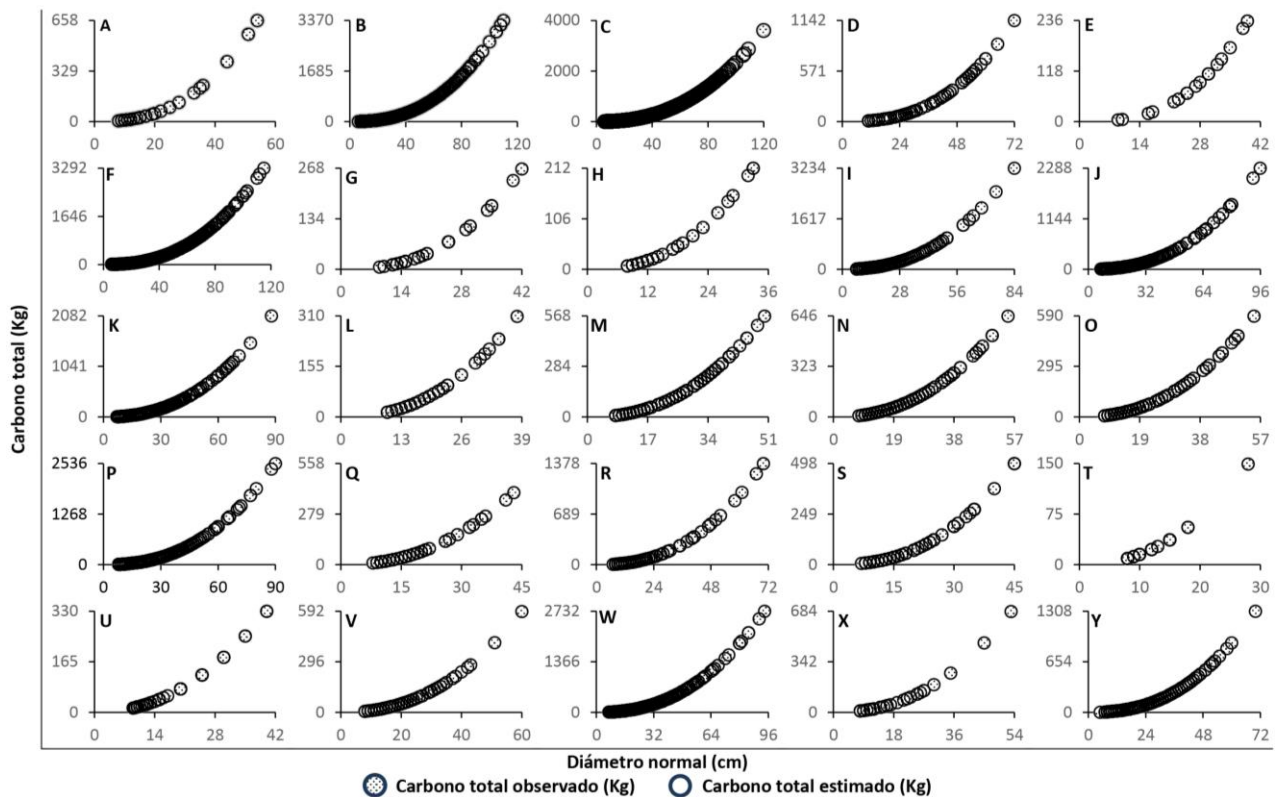
En este contexto, se encontró que el género *Pinus* presentó el mayor promedio por hectárea en el contenido de carbono total aéreo (CCF + CCR), donde *Pinus maximinoi* fue el más alto (17 985.92 + 1 461.01 kg ha<sup>-1</sup>), seguido por *P. oocarpa* (12 352.29 + 1 005.31 kg ha<sup>-1</sup>) y *P. douglasiana* (5 985.08 + 461.79 kg ha<sup>-1</sup>). Por el contrario, *P. devoniana* (47.40 + 9.29 kg ha<sup>-1</sup>) y *P. lawsonii* (39.00 + 3.56 kg ha<sup>-1</sup>) presentaron los menores contenidos de carbono. Para el género *Quercus*, las especies que presentaron mayor promedio fueron *Quercus scytophylla* (2 595.14 + 867.00 kg ha<sup>-1</sup>), seguida por *Q. acutifolia* (1 569.93 + 613.10 kg ha<sup>-1</sup>) y finalmente *Q. elliptica*, con 1 512.16 + 544.19 kg ha<sup>-1</sup>; *Q. martinezii* presentó el valor más bajo (11.34 + 6.57 kg ha<sup>-1</sup>). En la Figura 2 se observa que el modelo describe de forma congruente el conjunto de datos en las

diferentes categorías diamétricas en todos los casos. Además, en la corrección de la heteroscedasticidad se observa una distribución homogénea de los residuos (Figura 3). Como resultado final se obtuvo la estructura de las ecuaciones de tipo simultánea, tanto para la biomasa total como para la estimación del carbono de cada una de las especies.

$$Bt = \alpha_0 * (dn^{\alpha_1}) + \beta_0 * dn^2$$

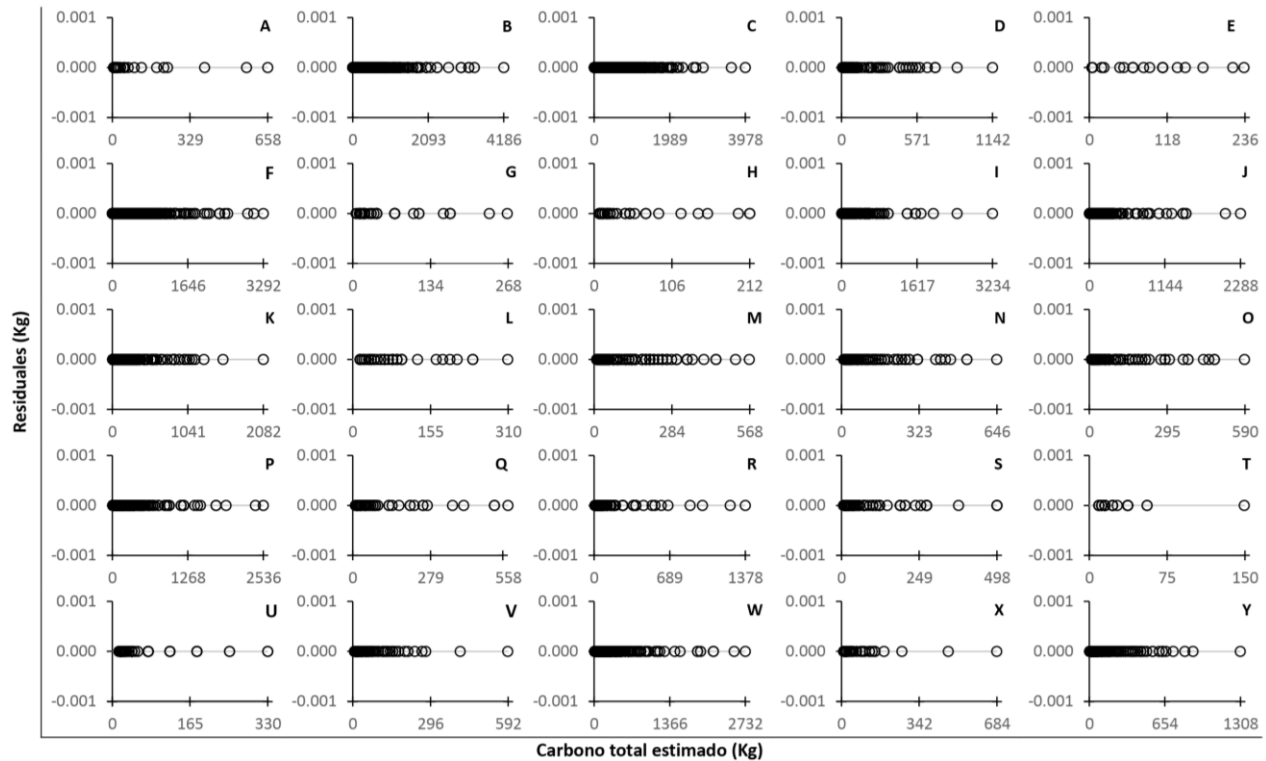
$$Cct = \alpha_0 * (dn^{\alpha_1}) + \beta_0 * dn^2$$

Bt = biomasa total, Cct = Contenido de carbono total, dn = diámetro normal (cm), y  $\alpha_1$  y  $\beta_0$  = parámetros estimados.



**Figura 2.** Comparación del contenido de carbono total observado vs estimado, donde: A: *Pinus pseudostrobus*. B: *Pinus douglasiana*. C: *Pinus maximinoi*. D: *Pinus montezumae*. E: *Pinus ayacahuite*. F: *Pinus oocarpa*. G: *Pinus devoniana*. H: *Pinus lawsonii*. I: *Pinus pringlei*. J: *Pinus teocote*. K: *Quercus acutifolia*. L: *Quercus candicans*. M: *Quercus castanea*. N: *Quercus conspersa*. O: *Quercus crassifolia*. P: *Quercus elliptica*. Q: *Quercus frutex*. R: *Quercus laeta*. S: *Quercus magnoliifolia*. T: *Quercus martinezii*. U: *Quercus ocoteifolia*. V: *Quercus rugosa*. W: *Quercus scytophylla*. X: *Arbutus xalapensis*. Y: *Clethra mexicana*.





**Figura 3.** Residuales de las estimaciones de carbono total, donde: A: *Pinus pseudostrobu*. B: *Pinus douglasiana*. C: *Pinus maximinoi*. D: *Pinus montezumae*. E: *Pinus ayacahuite*. F: *Pinus oocarpa*. G: *Pinus devoniana*. H: *Pinus lawsonii*. I: *Pinus pringlei*. J: *Pinus teocote*. K: *Quercus acutifolia*. L: *Quercus candicans*. M: *Quercus castanea*. N: *Quercus conspersa*. O: *Quercus crassifolia*. P: *Quercus elliptica*. Q: *Quercus frutex*. R: *Quercus laeta*. S: *Quercus magnoliifolia*. T: *Quercus martinezii*. U: *Quercus ocoteifolia*. V: *Quercus rugosa*. W: *Quercus scytophylla*. X: *Arbutus xalapensis*. Y: *Clethra mexicana*.

## DISCUSIÓN

Se ha documentado que las ecuaciones lineales y no lineales tienen la capacidad de describir los datos de biomasa de forma congruente en especies de pino y encino (Şahin *et al.* 2019). En este sentido, la ecuación seleccionada de Zhang *et al.* (2017) mostró ajustes significativos ( $p < 0.0001$ ), por lo que puede predecir la biomasa y la concentración del carbono aéreo de manera precisa a partir de variables de fácil medición, como el diámetro normal ( $dn$ ); en este orden de ideas, el diámetro normal es la variable predictora más utilizada para la estimación de la biomasa a nivel de árbol, y ha demostrado ser suficiente para describir los datos de diferentes especies (Ledesma *et al.* 2021, Sáenz-Reyes *et al.* 2021). En todos los casos se observó que el intercepto cambió con respecto a la variable dependiente en todas las especies, lo cual es lógico, ya que se espera que un árbol con diámetro cero (aunque en la realidad no sea el caso), debería tener un valor de cero de biomasa y carbono (Acosta-Mireles *et al.* 2011, Marroquín-Morales *et al.* 2023), y esta misma lógica aplica en los valores obtenidos para los parámetros que estiman el carbono de las ramas a través del ajuste simultánea, garantizando así la aditividad.

La aditividad es una condición obligatoria al desarrollar ecuaciones con énfasis en la biomasa total y por componentes arbóreos, ya que elimina las diferencias en la suma de los

diferentes componentes, como fuste, ramas o follaje y que muchas veces son ignoradas (Dong et al. 2015). En México, son pocos los estudios de este tipo; por ejemplo, Cuevas-Cruz et al. (2022) propusieron ecuaciones aditivas para componentes de biomasa de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. en Campeche, México, al igual que Vargas-Larreta et al. (2017b) y Flores-Medina et al. (2018), desarrollaron ecuaciones para especies del estado de Durango. De acuerdo, con Cortés-Sánchez et al. (2019) las ecuaciones de este tipo cobran relevancia al aplicarse en estudios de productividad en los ecosistemas forestales y asegurar de forma correcta la suma de la biomasa total a partir de los componentes. Aunado a lo anterior, Miguel-Martínez et al. (2016) en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, encontraron para *P. ayacahuite* Lindl. un 97% de su biomasa en el fuste y total, respectivamente.

Por otra parte, Pimienta-De la Torre et al. (2019) realizaron un estudio en las Margaritas, Chiapas, en el que encontraron resultados similares, donde la variabilidad de los datos explicó un 99% para la variable biomasa y carbono de 481 árboles de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. Para *Clethra mexicana* se encontró que la variable predictora (dn) explica el 92.33% de la variabilidad de los datos de biomasa en las ramas (9.96%) y el fuste (90.04%), respectivamente, lo cual es similar a lo reportado por Acosta-Mireles et al. (2011), quienes encontraron un coeficiente del 94% utilizando la misma ecuación. De igual forma, algunos estudios del género *Quercus* reportan resultados convincentes al tener coeficientes de determinación entre 88 y 94% (Cortés-Sánchez et al. 2019), así como de Ruiz-Aquino et al. (2014), obtuvieron valores de 97 a 99% para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, por lo que las ecuaciones generadas son confiables para su aplicación práctica.

La cantidad de biomasa y carbono en los diferentes componentes suelen ser diferentes para cada una de las especies debido a su morfología (Carrillo-Anzures et al. 2016), así como el tamaño, calidad del sitio y la edad (Riofrío et al. 2015), aunque la mayor biomasa se concentra en el fuste (Chávez-Aguilar et al. 2016). En este contexto, la mayoría de las especies del género *Pinus* acumulan más biomasa seca en sus diferentes componentes (tallo, ramas, hojas y raíces), superando a otras especies, como las del género *Quercus* y, en consecuencia, la concentración de carbono (Rodríguez-Ortiz et al. 2019). La acumulación de la biomasa en el género *Pinus* fue del 91.45% en el fuste, lo que se traduce en una proporción de carbono de 45.72%, quedando así el 8.55 y 4.27% de carbono en las ramas. En el género *Quercus* se encontró un promedio de biomasa y carbono de 30.28% (15.14%) y 69.72% (34.86%) en los compartimentos de ramas y fuste, respectivamente.

## CONCLUSIONES

Las ecuaciones propuestas presentaron parámetros para estimar la biomasa y el contenido de carbono total aéreo para árboles individuales En San Juan Quiahije, Oaxaca. Estas son herramientas esenciales para estudios de la masa forestal, ya que permiten predecir estas variables en los diferentes componentes arbóreos, sin necesidad de utilizar métodos destructivos. La mayor cantidad de biomasa y carbono es fijada en el fuste, siendo el género *Pinus* el que presentó la mayor cantidad, destacando *Pinus maximinoi*.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por apoyar en la realización de la estancia posdoctoral en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, Texcoco; así como a las autoridades agrarias de la comunidad de San Juan Quiahije, Juquila, en conjunto con los técnicos forestales (Ing. Gregorio Morales y la Bio. María del Sol), por el apoyo en el trabajo de campo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés.

## LITERATURA CITADA

- Acosta -Mireles M, Carrillo-Anzures F, Gómez-Villegas RG (2011) Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4): 529-543.
- Carrillo-Anzures F, Acosta-Mireles M, Jiménez-Cruz CDR, González-Molina L, Etchevers-Barra JD (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(3): 681-691. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.327>.
- Chávez-Aguilar G, Ángeles-Pérez G, Pérez-Suárez M, López-López MÁ, García-Moya E, Wayson C (2016) Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22(3): 23-36. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>
- Cortés-Sánchez BG, Ángeles-Pérez G, De los Santos-Posadas HM, Ramírez-Maldonado H (2019) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques* 25(2): e2521799. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521799>
- Cuevas-Cruz JC, Aquino-Ramírez 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>.
- Cuevas-Cruz JC, Aquino-Ramírez M, Kú-Chalé RC, Morales-Sosa IJ (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>.
- Diéguez-Aranda U, Barrio-Anta M, Castedo-Dorado F, Álvarez-González J (2005) Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. *Forest Systems* 14(2): 229-241. <https://doi.org/10.5424/srf/2005142-00886>.
- Dong L, Zhang L, Li F (2015) Developing additive systems of biomass equations for nine hardwood species in Northeast China. *Trees* 29(4): 1149-1163. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1196-1>.
- Flores-Medina F, Vega-Nieva D, Corral-Rivas J, Álvarez-González J, Ruiz-González A, López-Sánchez C, Carillo-Parra A (2018) Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(46): 158-185. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>.
- Ganamé M, Bayen P, Ouédraogo I, Balima LH, 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>.
- Graciano-Ávila G, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón OA, González-Tagle MA, Treviño-Garza EJ, Mora-Olivo A, Buendía-Rodríguez E (2019) Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(2): 119-127.
- Harris NL, Gibbs DA, Baccini A, Birdsey RA, De Bruin S, Farina M, Fatoyinbo L, Hansen MC, Herold M, Houghton R, Potapov P, Suarez DR, Roman SS, Saatchi SS, Slay C, Turubanova SA, Tyukavina A (2021) Global maps of

- twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change* 11(3): 234-240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
- Harvey AC (1976) Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 44(3): 46-465.
- INEGI (2023a) Instituto Nacional de Estadística y Geografía Información geográfica. División por entidad federativa con base en el marco geoestadístico, [www.inegi.gob.mx/geo/informaciongeografica/oaxaca](http://www.inegi.gob.mx/geo/informaciongeografica/oaxaca). Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2023.
- INEGI (2023b) Instituto Nacional de Estadística y Geografía Sistemas de consulta. Espacio y datos de México. [www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=202130001](http://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=202130001). Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2023.
- IPCC (2005) Intergovernmental Panel on Climate Change Carbon Dioxide Capture and Storage. In: Metz B, Davidson O, de Coninck H, Loos M, Meyer L (eds) Cambridge University Press. New York. USA. 431p.
- Ledesma SG, Sione MS, Oszust JD, Rosenberger LJ (2021) Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del espinal (Entre Ríos, Argentina). *FAVE Sección Ciencias Agrarias* 20(1): 331-345. <https://doi.org/10.14409/fa.v20i1.10274>.
- 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. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3566>.
- Miguel-Martínez A, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Pérez-León MI, Castañeda-Hidalgo E, Santiago-García W (2016) Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(7): 1575-1584. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>.
- 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. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611964>.
- Ordóñez-Díaz JAB, Galicia-Naranjo A, Venegas-Mancera NJ, Hernández-Tejeda T, Ordóñez-Díaz MDJ, Dávalos-Sotelo R (2015) Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21(Núm. Esp.): 77-216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>.
- Pimienta-de la Torre D de J, Reyes-Reyes J, Rodríguez-Morales JA, Marroquín-Morales P (2019) Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 23(2): 31-41.
- Rodríguez-Ortiz G, García-Aguilar JA, Leyva-López JC, Ruiz-Díaz C, Enríquez-del Valle JR, Santiago-García W (2019) Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques* 25(1): e2511713. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>.
- Riofrío J, Herrero C, Grijalva J, Bravo F (2015) Aboveground tree additive biomass models in Ecuadorian highland agroforestry systems. *Biomass and Bioenergy* 80: 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.026>.
- Ruiz-Aquino F, Valdez-Hernández JI, Manzano-Méndez F, Rodríguez-Ortiz G, Romero-Manzanares A, Fuentes-López ME (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>.
- Sáenz-Reyes JT, Rueda-Sánchez A, Benavides-Solorio JD, Muñoz-Flores HJ, Castillo-Quiroz D, Sáenz-Ceja JE (2021) Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales tropicales en la Costa de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65): 26-44. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.856>.
- Şahin A, Kahrman A, Göktürk A (2019) Estimating diameter at breast height (DBH) from diameter at stump height (DST) in triple mixed stands in the region of Artvin in Turkey. *Forestist* 69(1): 61-67. <https://doi.org/10.26650/forestist.2019.18003>.
- Schumacher FX, Hall FS (1933) Logarithmic expression of timbertree volume. *Journal Agriculture Research* 47(9): 719-734.
- SiPlaFor (2015) Sistema de Planeación Forestal de Bosque Templado. Manual de usuario. Versión 2.0. <http://siplafor.cnf.gob.mx/siplafor/inicio/index.php>. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2023.
- Sotomayor CJR (2005) Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de la Madera. Investigación e Ingeniería de la Madera* 1(1): 3-20.
- SAS (2009) Static Analysis System, SAS/STAT® Ver. 9.2. User's Guide 2nd ed. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 7869p.

- Ter-Mikaelian MT, Korzukhin MD (1997) Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97(1): 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00019-4).
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ, Aguirre-Calderón OA, López-Martínez JO, Santos-Posadas HM, Zamudio-Sánchez FJ, Treviño-Garza EJ, Martínez-Salvador M, Aguirre-Calderón CG (2017a) SiBiFor: Forest biometric system for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23(3): 437-455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>.
- Vargas-Larreta B, López-Sánchez CA, Corral-Rivas JJ, López-Martínez JO, Aguirre-Calderón CG, Álvarez-González JG (2017b) Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests* 8(8): 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>.
- Wu H, Xu HA (2023) Review of Sampling and Modeling Techniques for Forest Biomass Inventory. *Agricultural & Rural Studies* 1 (10002): 2-12. <https://doi.org/10.59978/ar01010002>.
- Zhang X, Co QV, Xiang C, Duan A, Zhang J (2017) Predicting total and component biomass of Chinese fir using a forecast combination method. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(4): 687-691. <https://doi.org/10.3832/ifor2243-010>.