Ecuaciones alométricas para estimar **biomasa** en especies de **encino** en Guanajuato, México

Allometric equations to estimate biomass in oak species in Guanajuato, Mexico

Bossuet G. Cortés-Sánchez¹, Gregorio Ángeles-Pérez^{1*}, Héctor M. De los Santos-Posadas¹
y Hugo Ramírez-Maldonado²

¹ Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México. cortes.bossuet@colpos.mx, hmsantos@colpos.mx

² Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México. hugorm@correo.chapingo.mx

* Autor de correspondencia. gangeles@colpos.mx

RESUMEN

Los bosques de encino son importantes en el equilibrio de los ecosistemas donde estos cohabitan, ya que son un grupo de especies con mayor capacidad para fijar y almacenar carbono atmosférico. El objetivo de este trabajo fue desarrollar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de seis especies de encino (*Quercus rugosa*, *Q. obtusata*, *Q. sideroxyla*, *Q. coccolobifolia*, *Q. laurina* y *Q. candicans*) con un muestreo destructivo de 165 árboles. Se ajustaron ecuaciones para estimar biomasa por componentes estructurales (fuste, ramas y follaje), y de forma aditiva se estimó la biomasa total, así como una ecuación generalizada para las seis especies, y ecuaciones para estas divididas en dos grupos. Para mejorar la capacidad predictiva de las ecuaciones se ajustaron modelos que incluyen las variables de diámetro normal, altura total y densidad de la madera. El mayor porcentaje de biomasa se concentró en el fuste con 60.6%, mientras que ramas y follaje representaron 36.1% y 3.28%, respectivamente. Las ecuaciones ajustadas explicaron más de 95% de la variabilidad en la biomasa total del árbol y, comparadas con ecuaciones desarrolladas en otros lugares para el mismo género, presentaron un menor sesgo porcentual. Las ecuaciones alométricas generadas pueden ser utilizadas para la región, así como en bosques con características estructurales y de crecimiento similares a las de las comunidades de encino de la sierra de Guanajuato.

PALABRAS CLAVE: ajuste simultáneo, ecuaciones específicas, ecuaciones por grupo de especies, regresión iterativa aparentemente no relacionada, sesgo porcentual.

ABSTRACT

Oak forests are important from an environmental point of view, since they have a significant function as a carbon storage. This study is based on a destructive sampling of 165 oak trees with the objective of developing allometric equations to estimate aboveground biomass of six oak species (*Quercus rugosa*, *Q. obtusata*, *Q. sideroxyla*, *Q. coccolobifolia*, *Q. laurina* y *Q. candicans*). Allometric equations as additive system were generated to estimate biomass by structural components (stem, branches and foliage), the of additivity property guaranteed total biomass estimations as well as a generalized model. To improve the predictive capacity of the equations, models that include variables of diameter at breast height, total height and wood density were fitted. The highest percentage of biomass was concentrated in tree stem with 60.6%, while in the branches and foliage a concentration of 36.1 and 3.28%, respectively. The developed equations explained more than 95% of the total tree biomass, and compared with equations developed in other regions for the same genus, showed lower percentual bias. Such equations could be used for the region, as well as in forests with similar structural and growth features to those oak communities in forests from Santa Rosa and Guanajuato mountain ranges.

KEYWORDS: simultaneous fitting, specific equations, equations by species group, iterated seemingly unrelated regression, percentage bias.

INTRODUCCIÓN

El importante rol de los ecosistemas forestales como reservorios de carbono ha generado una alta demanda en la estimación de biomasa y carbono contenidos en los árboles (Zhang, Co, Xiang, Duan y Zhang, 2017). La estimación precisa de la biomasa es crucial para los diferentes fines que los usuarios necesiten, como un instrumento de planeación en la gestión forestal, para estudios científicos sobre productividad y/o flujo de nutrientes, así como para la evaluación de cambios en el ciclo del carbono (Chave *et al.*, 2005; Henry *et al.*, 2010). Además de ser globalmente valorados por los bienes que proveen a la sociedad, los ecosistemas forestales son un factor importante en el balance del ciclo del carbono y el calentamiento global (Pan *et al.* 2011; Bolaños-González, Bolaños-González, Paz-Pellat y Ponce-Pulido, 2017).

Existe la motivación para el uso de ecuaciones alométricas que permiten estimar biomasa, así como la necesidad de conocer las proporciones a través de los componentes estructurales de los árboles: raíz, fuste, corteza, ramas y hojas (Aquino-Ramírez, Velázquez-Martínez, Castellanos-Bolaños, De los Santos-Posadas y Etchevers-Barra, 2015; Sanquetta *et al.*, 2015). Estas ecuaciones establecen la relación entre dimensiones del árbol como diámetro normal (D_n) con biomasa total (B_t) o la contenida en algún componente estructural (Birdsey *et al.*, 2013). En estudios previos se ha enfatizado que la inclusión de variables independientes adicionales al D_n , como área total (A_t), diámetro de copa (D_c), densidad de la madera (ρ), pueden mejorar la capacidad predictiva de las ecuaciones de biomasa desarrolladas (Chave *et al.*, 2005; Feldpausch *et al.*, 2012; Sileshi, 2014).

La elección de una ecuación es una fuente de incertidumbre en la estimación de la biomasa en los bosques, debido a que puede variar sustancialmente dependiendo de la especie y sus condiciones de crecimiento (van Breugel, Ransijn, Craven, Bongers y Hall, 2011), donde varios estudios recomiendan el uso de ecuaciones locales para lograr una mayor precisión cuando se ejecuta a escalas menores (Nam, van Kuijk y Anten, 2016). El

entendimiento la variación de biomasa a escala local es crucial para la evaluación de las existencias de carbono a escala regional (Lima *et al.*, 2012).

Existe un déficit en ecuaciones de biomasa, además la colecta de datos para su estimación no es sistemática en las diferentes regiones forestales de México, y no se cuenta con algún seguimiento a largo plazo (Bolaños-González *et al.*, 2017). Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendi y Paz-Pellat (2015) publicaron 478 ecuaciones alométricas para México concentradas principalmente en las familias Pinaceae, Fabaceae y Fagaceae. A pesar de la alta diversidad de especies del género *Quercus* en México (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2016), las ecuaciones específicas son aún limitadas, por lo que frecuentemente se recurre a ecuaciones generalizadas (multiespecie) para la estimación de biomasa.

En la investigación forestal se han realizado esfuerzos para desarrollar ecuaciones para mejorar el conocimiento de los almacenes de carbono de especies del género *Quercus* en diferentes regiones de México con importancia forestal por su producción maderable; por ejemplo, las ecuaciones desarrolladas para el norte de México por Návar (2009) y Vargas-Larreta *et al.* (2017), o bien en conjunción con otras especies de latifoliadas en el centro de México (Soriano-Luna, Ángeles-Pérez, Martínez-Trinidad, Placencia-Escalante y Razo-Zárate, 2015). Aun así, las ecuaciones alométricas para este grupo de especies es limitado; sin embargo, son necesarias puesto que estos bosques representan una superficie considerable del territorio nacional, ya sea en bosques mezclados con gimnospermas o masas mezcladas del mismo género, como es el caso del estado de Guanajuato, particularmente la Sierra de Santa Rosa, donde no se han realizado estimaciones precisas de biomasa a nivel de árbol, la cual es una limitante para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de carbono de los bosques de la región.

OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo fueron (i) ajustar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea total y

por componente estructural por grupos de seis especies pertenecientes al género *Quercus* (*Quercus rugosa*, *Q. obtusata*, *Q. sideroxyla*, *Q. coccolobifolia*, *Q. laurina* y *Q. candicans*) y (ii) ajustar ecuaciones alométricas específicas para estimar biomasa total y por componente estructural para seis especies del género *Quercus* estructuralmente dominantes en los bosques de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en predios de la Sierra de Santa Rosa en Guanajuato, México. El área presenta un bosque templado incoetáneo con diversas especies forestales, dentro de los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo ($21^{\circ} 12' 52.65''$ N, $101^{\circ} 13' 30.80''$ O y $20^{\circ} 59' 11.79''$ N,

$101^{\circ} 06' 23.36''$ O) (Fig. 1). Estos predios comprenden una superficie total de 6877.74 ha, con una altitud que varía entre 2000 m y 2800 m. El área de estudio se encuentra en las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Sierra de Guanajuato, en la región fisiográfica Mesa Central. De acuerdo con la carta edafológica nacional escala 1:250 000, los principales tipos de suelo en el área de estudio son Luvisol crómico, Regosol esquelético y Pheozem lúvico (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2014). El clima predominante es C(w2) y C(w1)(w), templado sub-húmedo con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C y precipitación media anual de 200 mm a 1800 mm (Inegi, 2008).

Los bosques de encino en la sierra de Santa Rosa se componen por 15 especies del género *Quercus*

FIGURA 1. Localización del área de estudio en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

(*Quercus aristata* Hook., *Q. castanea* Née, *Q. coccolobifolia* Trel., *Q. crassipes* Humb. et Bonpl., *Q. eduardii* Trel., *Q. laeta* Liebm., *Q. laurina* Bonpl., *Q. microphylla* Née, *Q. obtusata* Bonpl., *Q. potosina* Trel., *Q. repanda* Bonpl., *Q. resinosa* Liebm., *Q. rugosa* Née, *Q. sideroxylla* Bonpl. y *Q. candicans* Née). Estas especies constituyen el principal componente arbóreo del bosque de la zona de estudio; y en menor proporción se encuentran *Pinus cembroides* Zucc., *Arbutus* spp y *Arctostaphylos pungens* Kunth. (Martínez-Cruz y Téllez-Valdés, 2004).

Trabajo de campo

La determinación de especies para la construcción de las ecuaciones de biomasa se formalizó mediante el cálculo del índice de valor de importancia relativo (IVIR) de la comunidad de *Quercus* spp. Los datos para el cálculo del IVIR se colectaron en parcelas del inventario para el programa de manejo de la región (Cabrera-Andrade, Cabrera-Landeros, Cabrera-Landeros, 2014). Con base en el valor alto de IVIR, se determinaron seis especies por la importancia estructural en la comunidad (Tabla 1).

TABLA 1. Especies muestreadas y parámetros dasométricos de los árboles muestreados.

Párametro	n	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
<i>Quercus rugosa</i> Née					
Díametro normal (cm)	26	7.6	44.5	20.37	10.79
Altura total (m)		5.85	17.8	11.76	3.37
Biomasa total (kg)		10.17	1216.13	257.45	315.39
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.60	
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.					
Díametro normal (cm)	34	6.2	37.6	20.97	8.48
Altura total (m)		4.85	14.2	9.34	2.02
Biomasa total (kg)		6.89	725.96	233.76	204.21
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.828	
<i>Quercus sideroxylla</i> Bonpl.					
Díametro normal (cm)	33	4.8	40.5	18.00	10.26
Altura total (m)		3.55	15.7	8.54	2.32
Biomasa total (kg)		4.46	994.09	194.90	236.87
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.813	
<i>Quercus coccolobifolia</i> Trel.					
Díametro normal (cm)	12	8.6	19.1	13.57	3.24
Altura total (m)		5.36	8.3	6.89	0.91
Biomasa total (kg)		20.85	131.31	62.77	39.43
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.60	
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.					
Díametro normal (cm)	30	5.8	48.6	22.04	13.28
Altura total (m)		4.35	20.6	12.87	4.21
Biomasa total (kg)		6.59	1471.23	342.62	431.48
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.66	
<i>Quercus candicans</i> Née					
Díametro normal (cm)	30	6.6	41.6	21.42	9.59
Altura total (m)		6.09	16.85	11.10	3.03
Biomasa total (kg)		9.92	1012.21	261.00	261.46
Densidad de la madera (g cm ⁻³)				0.694	
General					
Díametro normal (cm)	165	4.80	48.60	20.02	10.30
Altura total (m)		3.55	20.60	10.35	3.43
Biomasa total (kg)		4.46	1471.23	242.03	290.49
Densidad de la madera (g cm ⁻³)		0.60	0.83	0.72	0.09

D.E. = desviación estándar.

Un total de 165 árboles fueron seleccionados, cubriendo el espectro de categorías diamétricas con énfasis en diámetros pequeños y grandes con la finalidad de reducir la influencia de datos de alto apalancamiento que existe en estos (Alder y Cailliez, 1980; Burkhardt y Tomé, 2012). Con lo anterior, se representó la variabilidad en tamaños existente en los rodales. El número de árboles muestreados, así como sus tamaños, se presenta en la tabla 1.

Previo al derribo de los árboles, a cada uno se le midió el Dn (cm). Posterior al derribo se midió At (m), incluyendo la altura del tocón. De cada árbol se obtuvo la masa en condición fresca (P_f), por cada componente estructural (fuste, ramas y follaje), con una báscula electrónica de 500 kg de capacidad y resolución de 0.1 kg. Tres muestras de 1 kg, en promedio, fueron obtenidas en forma aleatoria de cada componente estructural: ramas y follaje. La medición de estas muestras se realizó en campo con una balanza de 10 kg de capacidad y 0.1 g de resolución. Para el fuste, se cortaron tres discos de 5 cm de grosor de la base, parte media y parte superior del fuste; se registró la masa de cada uno, en condición fresca. Para determinar la relación masa seca (P_s)/ P_f , todas las muestras (fuste, ramas y follaje) se secaron en laboratorio en una estufa a 70 °C hasta obtener una masa constante. El seguimiento de la masa de las muestras se realizó con una balanza de 10 kg de capacidad y 0.1 g de resolución. Con estos datos se determinó el contenido de humedad y con el factor $r = P_s/P_f$ se estimó la biomasa por componente estructural (B_{ce}) = $P_f * r$. La Bt de cada árbol se obtuvo con la suma de la biomasa de los tres componentes (Acosta-Mireles, Vargas-Hernández, Velázquez-Martínez y Etchevers-Barra, 2002; Soriano-Luna *et al.*, 2015).

Ajuste de ecuaciones

Las ecuaciones para estimar biomasa generalmente utilizan el Dn como variable independiente, sin embargo, el empleo de la At aumenta la capacidad predictiva del modelo. La ausencia de esta variable puede llegar a sobreestimar la biomasa (Feldpausch *et al.*, 2012; Ruiz-Aquino *et al.*, 2014).

Después de obtener la biomasa de cada componente estructural y total de cada árbol, con datos de Dn y At , se ajustaron ocho diferentes ecuaciones encontradas en la literatura y que son ampliamente utilizadas (Soriano *et al.*, 2015). Las ecuaciones con mejor ajuste para cada componente se integraron a un sistema de ecuaciones simultáneas para garantizar que la biomasa total aérea fuera la suma de la biomasa por componente estructural (Parresol, 2001; Alvarez-González *et al.*, 2007, ecuación 1).

$$Bt = B_{fuste} + B_{ramas} + B_{follaje} \quad (1)$$

De las diferentes ecuaciones evaluadas para estimar Bt , se seleccionaron cuatro ecuaciones (Tabla 2). El modelo 1 solamente utiliza el Dn como variable independiente, mientras que las ecuaciones 2 y 3 incluyen Dn y H , y el modelo 4 incluye además la densidad de la madera. Cabe mencionar que el modelo 2 es una variante utilizada por Soriano *et al.* (2015) del modelo de variable combinada propuesta por Spurr (1952), quien sugiere que el escalamiento permite la sensibilidad de los parámetros del modelo.

La estimación de biomasa mediante ajuste independiente de los componentes estructurales muestra inconsistencias en la suma de la biomasa estimada de los componentes comparada con la biomasa total observada (Parresol, 1999; Sanquetta *et al.*, 2015), por lo que este método no fue apropiado para los fines de este trabajo. Para eliminar las inconsistencias, varios estudios recomiendan garantizar la aditividad en un sistema de ecuaciones

TABLA 2. Modelos con mejores parámetros de bondad de ajuste.

Modelo	Ecuación	Referencia
1	$B = \alpha_0 Dn^{\alpha_1}$	Zhang <i>et al.</i> (2017)
2	$B = \exp(-\alpha_0)(Dn^2 At)^{\alpha_1}$	Soriano <i>et al.</i> (2015)
3	$B = \alpha_0 Dn^{\alpha_1} At^{\alpha_2}$	Schumacher – Hall (1933)
4	$B = \alpha_0 (\rho Dn^2 At)^{\alpha_1}$	Chave <i>et al.</i> (2014)

B : biomasa total o por componente estructural (kg), Dn : diámetro normal (cm), At : altura total (m), ρ : densidad de madera ($g\ cm^{-3}$) y α : parámetros a estimar.

simultaneas (Parresol, 2001; Bi, Turner y Lambert, 2004; Zhang *et al.*, 2017).

El ajuste simultáneo se realizó mediante el método de regresión iterativa aparentemente no relacionadas (*Iterated Seemingly Unrelated Regression*, *ITSUR*), utilizando el procedimiento MODEL del paquete estadístico de SAS/ETS® ver. 9.4 (SAS Institute, Inc., 2011). Este método minimiza el error asociado al sistema de ecuaciones y permite la obtención de estimadores consistentes de los componentes en los sistemas no lineales (Álvarez-González, Balboa-Murias, Merino y Rodríguez-Soalleiro, 2005). Álvarez-González, Rodríguez-Soalleiro y Rojo-Alboreca, (2007) mencionan que el sistema de ecuaciones resultante del ajuste es siempre el mejor posible, aunque el ajuste de las ecuaciones de cada partición de forma individual no sea necesariamente el mejor. Es común que el ajuste de este tipo de ecuaciones presente heterocedasticidad, por lo que se empleó regresión ponderada para solventar este problema a través de la función: $1/(Dn^2 \cdot A^2)$, la cual presentó mayor consistencia en los estimadores (Parresol, 1999; Álvarez-González *et al.*, 2007).

Con esta metodología la estimación de biomasa por componente estructural se desarrolló bajo dos enfoques: un sistema de ecuaciones general o multiespecie que integra todas las especies muestreadas y un sistema de ecuaciones donde las especies se separaron en dos grupos estadísticamente similares; y un sistema de ecuaciones específicas para cada especie muestreada.

Grupos de especies

La biomasa total de las seis especies de encino se analizó de manera simultánea para conocer si existían diferencias entre especies y determinar si pudieran ser agrupadas mediante un análisis de covarianza. Mediante un análisis de regresión lineal se realizó una prueba de adicionalidad, incorporando variables indicadoras (Montgomery y Peck, 1982; Aquino-Ramírez *et al.*, 2015), mediante la expresión (2):

$$Bt = \alpha_0 + \beta_1(Dn^2H) + \varepsilon \quad (2)$$

A esta expresión se incorporó el factor de especie como variable indicadora (ecuación 3):

$$Bt = [\alpha_0 + \alpha_1Z_1 + \alpha_2Z_2 + \dots + \alpha_5Z_5] + [\beta_0 + \beta_1Z_1 + \beta_2Z_2 + \dots + \beta_5Z_5](Dn^2H) + \varepsilon \quad (3)$$

$$Z_1 = \begin{matrix} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{coccolobifolia} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{matrix}$$

$$Z_2 = \begin{matrix} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{rugosa} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{matrix}$$

$$Z_3 = \begin{matrix} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{siredoxyla} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{matrix}$$

$$Z_4 = \begin{matrix} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{laurina} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{matrix}$$

$$Z_5 = \begin{matrix} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{candicans} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{matrix}$$

donde:

Bt = biomasa total aérea del árbol (kg)

Dn = diámetro normal (cm)

H = la altura (m)

Z_1, Z_5 = variables indicadoras

α_0, β_0 = parámetros de regresión

$\beta_1 \dots \beta_5$ = parámetros de regresión debido a la adicionalidad

ε = error

Como especie base se consideró a *Quercus obtusata* dado que fue la especie con mayor número de árboles muestreados con 34 individuos. Para integrar a las especies en un solo grupo, se consideró la homogeneidad de pendientes ($H0 = \beta_1 = \dots = \beta_5 = 0$) (Aquino *et al.*, 2015).

Validación de ecuaciones

El ajuste de las ecuaciones se verificó mediante la técnica de validación cruzada, evaluando la precisión. Además, se realizaron análisis numéricos y gráficos de los residuales que permite diagnosticar posibles anomalías de los modelos utilizados. El error absoluto promedio porcentual (EAPP, ecuación 4) y el sesgo se cuantificó utilizando la ecuación 5, propuesta por Sileshi (2014), quien señala que este es un

estadístico utilizado con mucha frecuencia para comparar el desempeño de las ecuaciones. La estructura de las ecuaciones para el cálculo de EAPP y sesgo son las siguientes:

$$EAPP = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Bo - Bp|}{Bo} \quad (4)$$

$$Sesgo = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Bp - Bo}{Bo} \quad (5)$$

donde:

Bo = biomasa del árbol observada

Bp = biomasa del árbol predicha

n = número de árboles

Para análisis de ajuste se consideró el coeficiente de determinación ajustada (R^2_{adj}) que expresa la variabilidad explicada por el modelo tomando en cuenta el número de parámetros. Asimismo, se tomó en cuenta la raíz del cuadrado medio del error (RCME) que define la precisión de las estimaciones (Aquino *et al.*, 2015), el error absoluto promedio porcentual (EAPP) y el sesgo promedio, que ayudaron para evaluar el comportamiento de la ecuación (Forrester *et al.*, 2017).

RESULTADOS

Distribución de biomasa individual

La biomasa de fuste y ramas aumentaron proporcionalmente conforme aumentó el tamaño del árbol; aunque la biomasa de ramas presentó mayor variación que la de fuste. La mayor proporción de biomasa en los encinos muestreados se concentró en el fuste con un promedio de 60.6%, mientras que la proporción para ramas fue en promedio de 36.1% y de 3.28% en el follaje (Fig. 2). En especies como *Q. obtusata* y *Q. sideroxylla* en árboles grandes la biomasa de ramas fue mayor a la biomasa de fuste, lo que refleja las diferencias arquitectónicas y de asignación de biomasa entre especies del mismo género.

Ecuaciones de biomasa por componente estructural

Este enfoque incluyó a todos los árboles muestreados de las seis especies. Las ecuaciones con los mejores parámetros estadísticos ajustados y estadísticos de bondad de ajuste

FIGURA 2. Distribución de biomasa promedio por componente estructural global y de las seis especies y de encino evaluadas en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

para estimar biomasa de cada componente estructural fueron seleccionados (Tabla 3). El uso de la variable ρ presentó buen ajuste, pero inferior al modelo dos de forma Schumacher y Hall (1933), utilizado para ajustar la biomasa de fuste y ramas (Tabla 4 y 5); mientras que la biomasa de follaje se ajustó utilizando solo el Dn (Fig. 3).

En las tablas 4 y 5 se presentan los estimadores de los parámetros, así como los estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas de ecuaciones 1 y 2, respectivamente, donde se observa una ligera disminución en la RCME y en la R^2_{adj} en el sistema de ecuaciones 2.

El sistema de ecuaciones que estima la biomasa de especies de encino en sus componentes de fuste y ramas fue la ecuación 3 de forma Schumacher y Hall (Tabla 4). Los estadísticos de bondad de ajuste son los menores en

términos del RMSE y altos en la R^2 ajustada. Además, para la estimación de la biomasa total, el sistema de ecuaciones 1 mostró los mejores estadísticos de bondad de ajuste en comparación con el sistema de ecuaciones 2 (que incluyó la ρ como variable independiente) (Tablas 4 y 5).

En la tabla 6 se presentan los modelos 3 y 4 ajustados para estimar B_t , los cuales presentaron los mejores parámetros de bondad de ajuste. Las ecuaciones muestran un mejor ajuste que los sistemas de ecuaciones propuestos anteriormente, por lo que son recomendables cuando solo interesa estimar la B_t , ya que con dichas ecuaciones no es posible estimar la biomasa por componente estructural.

Al utilizar el sistema de ecuaciones 1 para analizar la partición de biomasa con el aumento del tamaño del árbol, se observó una disminución de la proporción de biomasa

TABLA 3. Sistema de ecuaciones para determinar biomasa por componente estructural y total.

Sistema de ecuaciones 1	Sistema de ecuaciones 2
$B_f = \alpha_0 D^{\alpha_1} A t^{\alpha_2}$	$B_f = \alpha_0 (\rho D n^2 A t)^{\alpha_1}$
$B_r = \alpha_3 D^{\alpha_4} A t^{\alpha_5}$	$B_r = \alpha_2 (\rho D n^2 A t)^{\alpha_3}$
$B_h = \alpha_6 D^{\alpha_7}$	$B_h = \alpha_4 D^{\alpha_5}$
$B_t = \alpha_0 D^{\alpha_1} A t^{\alpha_2} + \alpha_3 D^{\alpha_4} A t^{\alpha_5} + \alpha_6 D^{\alpha_7}$	$B_t = \alpha_0 (\rho D n^2 A t)^{\alpha_1} + \alpha_2 (\rho D n^2 A t)^{\alpha_3} + \alpha_4 D^{\alpha_5}$

B_t : biomasa total (kg); B_f : biomasa de fuste (kg); B_r : biomasa de rama (kg); B_h : biomasa de follaje (kg); Dn : diámetro normal (cm); At : altura total (m); ρ : densidad de madera estimada con base en la masa determinada secando la madera a 70 °C hasta peso constante, (g cm^{-3}) y α : parámetros a estimar.

TABLA 4. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones 1, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total.

Modelo	Ecuación	RCME	R^2_{adj}
3	$B_f = 0.03367 \times Dn^{1.853235} \times At^{0.982072}$	26.6329	0.9705
3	$B_r = 0.027143 \times Dn^{3.228496} \times At^{-0.82824}$	45.6342	0.8913
1	$B_h = 0.0059 \times Dn^{2.246321}$	3.4853	0.8086
	$B_t = \Sigma B_i$	54.1079	0.9653

TABLA 5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones 2, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total empleando modelos que incluyen la densidad de madera (ρ)* como variable independiente.

Modelo	Ecuación	RCME	R^2_{adj}
4	$B_f = 0.00676 \times (\rho D n^2 \times A t)^{1.155141}$	42.3445	0.9255
4	$B_r = 0.486602 \times (\rho D n^2 \times A t)^{0.631701}$	69.713	0.7462
1	$B_h = 1.383732 \times Dn^{1.121362}$	4.9442	0.6149
	$B_t = \Sigma B_i$	63.8259	0.9517

* Densidad calculada con base en la masa determinada secando la madera a 70 °C hasta peso constante,

Figura 3. Sistema de ecuaciones 1 ajustado para estimar biomasa por componente estructural del árbol: A) fuste, B) ramas, C) Follaje y D) Biomasa total (Modelo 3).

TABLA 6. Biomasa total estimada a partir de biomasa total observada con los modelos 3 y 4.

Modelo	Ecuación	RCME	R ² adj
3	$Bt = 0.074153 \times Dn^{2.423372} \times At^{0.174426}$	53.6211	0.9659
4	$Bt = 0.057707 \times (\rho Dn^2 \times At)^{0.989101}$	59.7288	0.9577

del fuste, la cual fue máxima en individuos menores a 15 cm de Dn . El mismo patrón se presentó para la Bf , la cual fue más alta en árboles pequeños. Por su parte, con el aumento del tamaño del árbol la proporción de biomasa de ramas aumentó (Fig. 4). En promedio, la proporción de biomasa estimada con el sistema de ecuaciones 1 fue de 56.49% ($\pm 6.28\%$), 40.42% ($\pm 6.77\%$) y 3.09% ($\pm 0.52\%$), para fuste, ramas y follaje, respectivamente.

Ecuaciones alométricas por grupo de especies

De los resultados obtenidos en el análisis de covarianza (Tabla 7) indican que existe la suficiente evidencia para agrupar a las seis especies de encino en dos grupos, donde las especies *Q. rugosa*, *Q. laurina* y *Q. candicans*, presentaron

diferencias significativas entre las pendientes ($\beta_0 = \beta_2$, $p \leq 0.0001$; $\beta_0 = \beta_4$, $p \leq 0.0001$; $\beta_0 = \beta_5$, $p \leq 0.0001$) con respecto a *Q. obtusata*. Lo anterior sugiere la posibilidad de agrupar estas especies en “Grupo 1”, mientras que los parámetros de las especies *Q. sideroxyla* y *Q. coccolobifolia* no son significativos respecto a la especie base *Q. obtusata*, por lo que se agruparon en el “Grupo 2” (Tabla 7). Los parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones para los grupos de especies 1 y 2, se presentan en la tabla 8.

El uso de variables indicadoras en un análisis de covarianza de un modelo lineal ayudó a encontrar diferencias significativas en la biomasa debido a las características propias de las especies, esto permite agrupar

en función de la similitud alométrica entre ellas como lo sugiere Picard, Saint-André y Henry (2012).

Las diferencias en biomasa entre grupos de especies de encino analizadas están determinadas por parámetros estadísticos (el nivel de significancia [p] de la pendiente de la regresión). Asimismo, estas diferencias están determinadas por la densidad de la madera, así como por la arquitectura de las diferentes especies muestreadas como lo señalan Basuki, van Laake, Skidomore y Hussin, (2009),

para especies tropicales, y Aquino-Ramírez *et al.* (2015) para *Cupania dentata* DC., *Alcornoque latifolia* SW. e *Inga punctata* Willd. De los grupos identificados se observa que el grupo 2 contiene más biomasa por unidad de volumen (expresado como la variable combinada Dn^2At) (Fig. 5). Lo anterior se debe a que las especies que lo conforman, *Q. coccolobifolia*, *Q. sideroxyla* y *Q. obtusata*, poseen una densidad de la madera más alta que las del grupo 1.

FIGURA 4. Patrón de asignación de biomasa para seis especies de encino, estimada a partir del sistema de ecuaciones 1.

TABLA 7. Valores de la prueba de adicionalidad para discernir el posible agrupamiento de especies.

Especie	Parámetro	Estimador	Valor t	Pr< t
<i>Q. obtusata</i>	α_0	-9.44442	-0.61	0.5404
	β_0	0.046068	20.29	<0.0001
<i>Q. coccolobifolia</i>	α_1	8.100332	0.22	0.8885
	β_1	-0.000004	-0.00	0.9998
<i>Q. rugosa</i>	α_2	2.701167	0.13	0.8991
	β_2	-0.01141	-4.39	<0.0001*
<i>Q. sideroxyla</i>	α_3	17.13583	0.86	0.3912
	β_3	0.00327	-1.12	0.2638
<i>Q. laurina</i>	α_4	-3.44984	-0.17	0.8663
	β_4	-0.01331	-5.53	<0.0001*
<i>Q. candicans</i>	α_5	15.27748	0.72	0.4743
	β_5	-0.01067	-3.95	0.0001*

α_0 y β_0 : parámetros de la regresión; β_1 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. coccolobifolia*; β_2 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. rugosa*; β_3 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. sideroxyla*; β_4 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. laurina*; β_5 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. candicans*.

TABLA 8. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa en grupos de encinos en Guanajuato, México.

Ecuación	RCME	R^2_{adj}
<u>Grupo 1</u>		
$Bf = 0.031052 \times Dn^{1.992101} \times At^{0.835385}$	29.88	0.98
$Br = 0.002501 \times (Dn^2 \times At)^{1.165467}$	58.46	0.85
$Bh = 0.005943 \times Dn^{2.23940}$	4.06	0.80
$Bt = \sum Bi$	68.89	0.96
<u>Grupo 2</u>		
$Bf = 0.072967 \times Dn^{2.087881} \times At^{0.32756}$	27.71	0.90
$Br = \exp(-5.345159) \times (Dn^2 \times At)^{1.168119}$	46.78	0.86
$Bh = 0.004423 \times (Dn^2 \times At)^{2.346752}$	2.69	0.82
$Bt = \sum Bi$	39.23	0.97

Dn : diámetro normal (cm); At : altura total (m); Bf : biomasa de fuste (kg); Br : biomasa de ramas (kg); Bh : biomasa de follaje (kg); Bt : biomasa aérea total ($Bf + Br + Bh$) (kg); RCME es la raíz del cuadrado medio del error.

FIGURA 5. Biomasa total por grupos de especies, se observa diferente patrón para cada grupo. Grupo 1: *Q. rugosa*, *Q. candicans* y *Q. laurina*; grupo 2: *Q. obtusata*, *Q. coccolobifolia* y *Q. sideroxylla*.

Ecuaciones específicas

Se desarrollaron seis sistemas de ecuaciones, uno para cada especie de encino. Estos sistemas cumplieron con la propiedad de aditividad y fueron consistentes para que la suma de las estimaciones de biomasa de cada componente estructural fuera similar a la Bt estimada. Las ecuaciones

específicas presentaron coeficientes de determinación eficientes ($R^2_{adj} > 0.93$) para la estimación de Bt ; los más bajos se presentaron en las ecuaciones para estimar biomasa de follaje (Tabla 9). Este componente estructural es uno de los más complicados para lograr un buen ajuste.

TABLA 9. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa de seis especies de encino en Guanajuato, México.

Ecuación	RCME	R ² adj
<i>Q. rugosa</i>		
$Bf = 0.009439 \times Dn^{1.901368} \times At^{1.401346}$	23.29	0.98
$Br = 0.57163 \times Dn^{3.049264} \times At^{-1.74729}$	52.58	0.85
$Bh = 0.015364 \times Dn^2 \times At$	3.83	0.85
$Bt = \Sigma Bi$	65.15	0.96
<i>Q. candicans</i>		
$Bf = \exp(-4.775313) \times Dn^{1.798292} \times At^{1.570775}$	26.78	0.96
$Br = \exp(-3.547008) \times Dn^{2.593972}$	47.84	0.86
$Bh = \exp(-4.752007) \times Dn^2$	2.58	0.60
$Bt = \Sigma Bi$	69.02	0.93
<i>Q. laurina</i>		
$Bf = \exp(-3.184629) \times Dn^{2.025824} \times At^{0.690906}$	34.31	0.98
$Br = \exp(-6.893717) \times (Dn^2 \times At)^{1.247303}$	44.92	0.94
$Bh = \exp(-4.816123) \times Dn^{2.174373}$	3.23	0.92
$Bt = \Sigma Bi$	60.25	0.98
<i>Q. coccolobifolia</i>		
$Bf = \exp(-2.628007) \times Dn^{1.884293} \times At^{0.629242}$	4.13	0.96
$Br = \exp(-6.885812) \times (Dn^2 \times At)^{1.393789}$	9.84	0.75
$Bh = \exp(-1.998072) \times Dn$	0.70	0.33
$Bt = \Sigma Bi$	9.82	0.94
<i>Q. sideroxyla</i>		
$Bf = \exp(-2.988285) \times Dn^{1.613082} \times At^{1.16314}$	17.79	0.97
$Br = \exp(-4.317865) \times Dn^{3.305381} \times At^{-0.64785}$	25.53	0.96
$Bh = \exp(-4.613824) \times Dn^{2.16245}$	2.40	0.91
$Bt = \Sigma Bi$	26.52	0.99
<i>Q. obtusata</i>		
$Bf = \exp(-3.53684) \times Dn^{2.043763} \times At^{0.759522}$	31.37	0.86
$Br = \exp(-5.803952) \times (Dn^2 \times At)^{1.224292}$	50.74	0.84
$Bh = \exp(-6.181035) \times Dn^{2.488617}$	2.01	0.82
$Bt = \Sigma Bi$	50.50	0.94

Dn: diámetro normal (cm); *At*: altura total (m); *Bf*: biomasa de fuste (kg); *Br*: biomasa de ramas (kg); *Bh*: biomasa de follaje (kg); *Bt*: biomasa aérea total ($Bf + Br + Bh$) (kg); RCME es la raíz del cuadrado medio del error.

DISCUSIÓN

A pesar del gran esfuerzo en la generación de ecuaciones alométricas de biomasa para grupos de encinos en México, aun existen vacíos para regiones específicas. En este estudio se generaron dos sistemas de ecuaciones para seis especies de encino; además se generaron ecuaciones específicas para cada una de ellas. Los resultados difieren de los obtenidos para otras especies del mismo género, donde para las especies *Q. sideroxyla*, *Q. rugosa*, *Q. durifolia* Seemen y *Q.*

crassifolia Bonpl. Localizadas en Durango, México, la biomasa promedio fue de 73.8%, 22.2% y 4.0% para *Bf*, *Br* y *Bf*, respectivamente (Vargas-Larreta *et al.*, 2017). Resultados similares fueron obtenidos por Gómez-Díaz, Etchevers-Barra, Monterroso-Rivas, Campo-Alvez y Tinoco-Rueda (2011) para *Q. magnoliifolia* Neé. con promedio de 62.9% para *Bf*, 27.8% para *Br*, aunque diferente para *Bh* con 9.6%. Por su parte, Gómez-García y Pérez-Rodríguez (2015) estimaron que la biomasa total de

Quercus spp. varía entre 61% y 69% en fuste mientras que en la copa (ramas y follaje) entre 31% y 39% de la biomasa total; y Ruiz-Aquino *et al.* (2014) encontró que para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* el promedio de biomasa de fuste fue mayor a 82%. Las diferencias entre especies en la asignación de biomasa entre componentes estructurales de sus individuos, se deben a la arquitectura de la copa de cada especie, la cual a su vez está determinada por las condiciones ambientales a lo largo de su distribución natural (Henry *et al.*, 2010; Nam *et al.*, 2016).

La inclusión de la variable de la ρ disminuyó ligeramente el ajuste de los parámetros para estimar biomasa de los componentes estructurales, así como de la biomasa total. Esta variable suele ser muy importante para el ajuste de ecuaciones de biomasa de especies arbóreas en regiones tropicales (Chave *et al.*, 2005), mientras que para los bosques templados se ha observado que la inclusión de la *At* ayuda a mejorar la estimación en mayor medida que la densidad de la madera (Henry *et al.*, 2010).

Aun cuando se ha observado que el *Dn* es la principal variable independiente para estimar la biomasa total y por componente estructural del árbol (Forrester *et al.*, 2017), en este estudio, la inclusión de la *At* incrementó la precisión en la estimación de la biomasa en las seis especies muestreadas, aunque en el caso de follaje, la inclusión de esta última variable predictora, además del *Dn*, resultó en menor calificación de los parámetros de bondad de ajuste. Trabajos similares han señalado la necesidad de incluir la *At* para evitar sobreestimaciones de biomasa principalmente en árboles de grandes dimensiones (Feldpausch *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017).

Cuando se compararon las estimaciones de las ecuaciones presentadas en este estudio con respecto a las publicadas previamente para especies de encino en México, se detectaron diferencias. El modelo general propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017) para cuatro especies de encino de Durango, México (*Q. sideroxyla*, *Q. rugosa*, *Q. durifolia* y *Q. crassifolia*), aplicado a los datos provenientes de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, tiende a sobreestimar ligeramente la biomasa en diámetros inferiores a 35 cm, mientras que a

subestimar la biomasa de árboles con diámetros mayores a 35 cm.

En la tabla 10 se presenta la comparación de la capacidad de estimación del sistema de ecuaciones 1 y 2 desarrolladas en este trabajo, y el del sistema propuesto Vargas-Larreta *et al.* (2017) para especies de encino del norte de México.

Las tres ecuaciones se evaluaron mediante validación cruzada en “10-fold”. El sistema 1 mostró un error absoluto promedio porcentual inferior de 18.8%, mientras el sistema 2 tuvo un error ligeramente superior de 25.4%. No se observaron diferencias estadísticas entre estos sistemas de ecuaciones. El sesgo tuvo un comportamiento similar al descrito para el error.

En la figura 6 se presenta el comportamiento del error (bias) de los sistemas de ecuaciones desarrollados en este estudio y comparados con el propuesto por Vargas Larreta *et al.* (2017). El sistema de ecuaciones 1 fue el más preciso para la estimación de la biomasa total y biomasa por componente estructural. El sistema de ecuaciones 2 que incluye densidad de la madera como variable independiente, resultó marginalmente similar en su sesgo. El sistema de ecuaciones propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017) presentó relativamente mayor error y sesgo que los demás sistemas al aplicarlo a los datos provenientes de especies encino de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Aun cuando en este último sistema se incluyeron dos especies en común con este estudio, *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa*, este fue desarrollado para el estado de Durango en el norte de México, es normal que su desempeño resultara relativamente menos eficiente comparado con las ecuaciones obtenidas en este estudio, debido a que las

TABLA 10. Comparación de error y sesgo para estimar biomasa total entre los sistemas propuestos (1 y 2), y el sistema de ecuaciones propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017).

Estadísticos	Sistema 1	Sistema 2	Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2017)
AEPP (%)	18.79	25.40	43.70
Sesgo (%)	11.46	15.77	37.93

FIGURA 6. Comparación del desempeño a través del sesgo promedio porcentual de los sistemas de ecuaciones generados en este estudio (sistemas 1 y 2) y un sistema de ecuaciones publicado para especies de encinos del norte de México.

ecuaciones locales siempre son más precisas, ya que representan de mejor manera el crecimiento de las especies (Chave *et al.*, 2005, 2014; Nam *et al.*, 2016).

Por otro lado, las características arquitectónicas y estructurales de los árboles varían de acuerdo con las condiciones ambientales prevalecientes a lo largo de su distribución natural, además que se incluyeron dos especies distintas (*Q. durifolia* y *Q. crassifolia*). A su vez, el crecimiento de estas también puede variar de acuerdo con las mismas condiciones ambientales y con las características de los rodales y mezcla de especies (Figueroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez y De los Santos-Posadas, 2010). Con respecto a la variabilidad en la muestra entre ambos estudios, el tamaño mínimo de los árboles muestreados fue similar, aunque en este estudio el tamaño máximo de los árboles fue relativamente menor, lo que pudo influir en el desempeño de los tres sistemas de ecuaciones.

CONCLUSIONES

El sistema de ecuaciones general fue adecuado para estimar y predecir biomasa individual para seis especies de encino, estructuralmente importantes en la Sierra de Santa Rosa

Guanajuato, al igual que un sistema de ecuaciones para estimar la biomasa por componente estructural, cuyo propósito es utilizarlo en estudios de partición de biomasa y determinación de productividad de rodales dominados por especies de encino. La diferencia estadística en la biomasa total de las seis especies de encino se le atribuye a la densidad de la madera a través del árbol y la morfología de las especies. Además de que los encinos de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, con respecto a otras especies de latifoliadas, presentaron una alta proporción de biomasa de ramas, llegando a tener una proporción 1:1 con respecto a la biomasa de fuste; y en algunos casos fue mayor la biomasa de ramas que de fuste. Los sistemas de ecuaciones de biomasa propuestos son buenos predictores de biomasa para árboles individuales y el uso adecuado en comunidades dominadas por especies de encino en la región donde fueron generados, y en bosques con condiciones estructurales y de crecimiento similares, contribuirán a la una mayor precisión en las estimaciones de los almacenes de biomasa y carbono, y así determinar el papel funcional en el almacenamiento de carbono y su papel en la mitigación del cambio climático.

Finalmente es conveniente resaltar que el contar con ecuaciones alométricas para estimar la biomasa por componente estructural es de suma importancia, ya que su aplicación puede verse potenciada en estudios sobre la productividad de ecosistemas forestales. Por esta razón se recomienda su parametrización en el desarrollo de ecuaciones alométricas en el futuro. Además, se sugiere el uso del enfoque de ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones, ya que se asegura que la *Bt* es el resultado de la suma de la biomasa por componente estructural.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & Etchevers-Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.
- Alder D., & Cailiez F. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, Italia. Estudios FAO Montes 22/2. Vol. 2
- Álvarez-González, J. G., Balboa-Murias, M. A., Merino, A., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais*, 1(1), 21-30.
- Álvarez-González, J. G., Rodríguez-Soalleir, R., & Rojo-Alboreca, A. (2007). Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 23, 35-42. doi: 10.31167/csef.v0i23.9603
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Castellanos-Bolaños, J. F., De los Santos-Posadas, H. M., & Etchevers-Barra, J. D. (2015). Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia*, 49(3), 299-314.
- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland dipterocarp forest. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1684-1694. doi: 10.1016/j.foreco.2009.01.027
- Bi, H., Turner, J., & Lambert, M. J. (2004). Additive biomass equations for native eucalypt forest tree of temperate Australia. *Trees*, 18(4), 467-479. doi: 10.1007/s00468-004-0333-z
- Birdsey, R., Angeles-Pérez, G., Kurz, W. A., Lister, A., Olguin, M., Pan, Y., ..., & Johnson, K. (2013). Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management*, 4(5), 519-537. doi: 10.4155/cmt.13.49
- Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F., & Ponce-Pulido, J. I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86. doi: 10.28940/terra.v35i1.243
- Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands*. Netherlands: Springer.
- Cabrera-Andrade, A., Cabrera-Landeros, J. M., & Cabrera-Landeros, I. (2014). *Refrendo de la autorización de aprovechamiento de recursos forestales maderables "Industrial Santa Fe S. de R. L."*. Guanajuato, México: Consultores en Manejo Forestal Sustentable S. C.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Föölster, H., ..., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecology*, 145, 87-99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ..., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. doi: 10.1111/gcb.12629
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2016). Estrategia nacional sobre la biodiversidad de México (ENBioMex) y plan de acción 2016 – 2030. México: Conabio.
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brien, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo M. A., ..., & Phillips, O. L. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), 3381-3403. doi: 10.5194/bg-9-3381-2012.
- Figueroa-Navarro, C. F., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & De los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105-112.
- Forrester, D. I., Tachauer, I. H. H., Annughoefer, P., Barbeito, I., Pretzch, H., Ruiz-Peinado, R., ..., & Sileshi, G. W. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396, 160-175. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011
- Gómez-Díaz, J. D., Etchevers-Barra, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Campo-Alvez, J., & Tinoco-Rueda, A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del*

- Ambiente*, 17(2), 261-272. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.11.117
- Gómez-García, E., & Pérez-Rodríguez, F. (2015). Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque*, 36(2), 255-264. doi: 10.4067/S0717-92002015000200011
- Harvey, A. C. (1976). Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica*, 44(3), 461-465. doi: 10.2307/1913974
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Bernoux, M., Saint-André L., & Valentini, R. (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. doi: 10.1016/j.foreco.2010.07.040
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (Consulta: septiembre de 2017)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2014). Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_seriei.aspx. (Consulta: septiembre de 2017)
- Martínez-Cruz, J., & Téllez-Valdés, O. (2004). Listado florístico de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 74, 31-49. doi: 10.17129/botsci.1685
- Montgomery, D. C., & Peck, E. A. (1982). Introduction to linear regression analysis. New York: Wiley.
- Nam, V. T., van Kuijk M., & Anten, N. P. R. (2016). Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam. *PloS ONE*, 11(6), 1-19. doi: 10.1371/journal.pone.0156827
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427-434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Lima, A. J. M., Suwa, R., de Mello Ribeiro, G. H. P., Kajimoto, T., dos Santos, J., da Silva, R. P., ..., & Higuchi, N. (2012). Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 277, 163-172. doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.028
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kuppi, P. E., Kurz, W. A., ..., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. doi: 10.1126/science.1201609
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573-593.
- Parresol, B. R. (2001). Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(5), 865-878.
- Picard, N., Saint-André, L., & 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. Roma, Italia. Montpellier, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. H., 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, México. *Madera y Bosques*, 20(2), 33-48. doi: 10.21829/myb.2014.202162
- Sanquetta, C. R., Behling, A., Dalla C., A. P., Péllico N., S., Schikowski, A. B., & do Amaral, M. K. (2015). Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. *Annals of Forest Science*, 72(8), 1099-1112. doi: 10.1007/s13595-015-0497-2
- SAS Institute Inc. (2011). SAS/STAT® 9.3. User's Guide. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- Schumacher, E. X., & Hall, F. D. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 4(9), 719-734.
- Sileshi, G. W. (2014). A critical of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329, 237-254.
- Soriano-Luna, M. A., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F.O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.
- Sotomayor C., J. R. (2015). Comportamiento elástico de la madera. Morelia, Michoacán, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. doi: 10.13140/RG.2.1.2972.7848

- Spurr, H. (1952). Forest inventory. Nueva York, EUA: Ronald Press.
- Van Breugel, M., Ransijn, V., Craven, D., Bongers, F., & Hall, J. S. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1648-1657. doi: 10.1016/j.foreco.2011.07.018
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. doi: 10.3390/f8080269
- Wang, C. (2006). Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 222(1), 9-16. doi: 10.1016/j.foreco.2005.10.074
- Zhang, X., Co, Q.V., 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. doi: 10.3832/for2243-010
- Manuscrito recibido el 12 de junio de 2018
- Aceptado el 18 de septiembre de 2018
- Publicado el 29 de julio de 2019
- Este documento se debe citar como:
- Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., De los Santos-Posadas, H. M., & Ramírez-Maldonado, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521799. doi: 10.21829/myb.2019.2521799

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