



Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales tropicales en la costa de Jalisco

Allometric equations, biomass and carbon in tropical forest plantations in the coast of Jalisco

J. Trinidad Sáenz Reyes¹, Agustín Rueda Sánchez², Juan de Dios Benavides Solorio², H. Jesús Muñoz Flores¹, David Castillo Quiroz³ y Jesús Eduardo Sáenz Ceja^{4*}

Abstract

Estimation of the aerial biomass is a key tool to determine the carbon stock potential of a species. Tropical-species plantations have been established in western Mexico, but their content and distribution of biomass and carbon storage are unknown. In this study, the content and distribution of aerial biomass and carbon storage of the native species *Enterolobium cyclocarpum* and *Tabebuia rosea*, and the exotic species *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* in 12-year plantations in the state of Jalisco were estimated. Also, the relation between aerial biomass and normal diameter was adjusted with linear, potential, and polynomial models. In the four species, most of the proportion of aerial biomass (58-67 %) was found in the stem. The normal diameter was confirmed as a good predictor of total aerial biomass since two species were adjusted to potential models, and two were adjusted to polynomial models, with which it is possible to estimate aerial biomass fast, easily, and at lower cost than with the destructive method. *T. grandis*, *G. arborea*, and *E. cyclocarpum* were the species with the greatest biomass (161 kg ha⁻¹, 134 kg ha⁻¹ and 130 kg ha⁻¹) and carbon storage potential (144.6 Mg ha⁻¹, 120.8 Mg ha⁻¹ and 117.5 Mg ha⁻¹). Forest plantations with these species may contribute to long-term carbon sequestration and global warming mitigation.

Keywords: Carbon stock, biomass, normal diameter, allometric models, tropical plantations, silviculture.

Resumen

La estimación de la biomasa aérea es una herramienta clave para determinar el potencial de almacenamiento de carbono de un taxón. En el occidente de México, se han establecido plantaciones forestales con especies tropicales, pero se desconoce el contenido y distribución de biomasa aérea seca, así como el almacenamiento de carbono. En este estudio se estimaron estos en plantaciones de 12 años de edad con los taxa nativos: *Enterolobium cyclocarpum* y *Tabebuia rosea*, e introducidas: *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, ubicadas en la Costa de Jalisco. Además, se ajustaron modelos lineales, potenciales y polinomiales de la relación de la biomasa aérea seca con respecto al diámetro normal. En las cuatro especies, la mayor proporción de la biomasa aérea seca (58-67 %) se obtuvo en el fuste. El diámetro normal resultó ser un buen predictor de la biomasa aérea seca total de las especies estudiadas, de las cuales dos se ajustaron a modelos potenciales y dos a modelos polinomiales, con los cuales es posible estimar dicho atributo de forma rápida, sencilla y a menor costo en comparación al método destructivo. *T. grandis*, *G. arborea* y *E. cyclocarpum* presentaron tanto el contenido de biomasa más alto (161 kg ha⁻¹, 134 kg ha⁻¹ y 130 kg ha⁻¹), como el mayor potencial de almacenamiento de carbono: 144.6 Mg ha⁻¹, 120.8 Mg ha⁻¹ y 117.5 Mg ha⁻¹, respectivamente. Las plantaciones forestales con estas especies pueden contribuir a la captura de carbono y mitigación del calentamiento global a largo plazo.

Palabras clave: Almacén de carbono, biomasa, diámetro normal, modelos alométricos, plantaciones tropicales, silvicultura.

Fecha de recepción/Reception date: 12 de septiembre de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 25 de noviembre de 2020

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Uruapan. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Noreste. Campo Experimental Saltillo. México.

⁴Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. UNAM Campus Morelia. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: jsaenz@cieco.unam.mx

Introducción

El establecimiento de plantaciones forestales se reconoce como una alternativa para mitigar el calentamiento global, mediante la captura del bióxido de carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis (Raven y Karley, 2006). El carbono asimilado por los árboles se almacena en los tejidos vegetales, que incluyen la biomasa aérea (fuste, ramas y follaje) y subterránea (raíces); por lo que las plantaciones pueden funcionar como reservorios de carbono durante décadas (Rytter, 2012).

El contenido de carbono varía entre las especies forestales, debido a las diferentes edades en las poblaciones, tasas de crecimiento, alturas y grosores máximos, así como a las condiciones climáticas y topográficas del sitio donde se desarrollan (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018). Por ello, la estimación de la biomasa aérea se ha convertido en un procedimiento clave para evaluar la capacidad de los taxones forestales para almacenar carbono (Soriano-Luna *et al.*, 2015).

El uso de ecuaciones alométricas permite el cálculo de la biomasa de una especie forestal de una manera no destructiva y extrapolable a situaciones de crecimiento similares, con parámetros relativamente fáciles de medir; tales como el diámetro y la altura (Montero y Montaguiri, 2005; Hernández-Ramos *et al.*, 2017). El diámetro normal es la variable que ha mostrado mayor correlación con el contenido de biomasa en diversos taxa forestales (Rueda *et al.*, 2014; Méndez-González *et al.*, 2016).

Entre los modelos alométricos empleados para estimar la biomasa se citan las regresiones lineales y no lineales (exponenciales y polinomiales) (Pacheco *et al.*, 2007; López-Reyes *et al.*, 2016). A escala local y de especie, es fundamental desarrollar modelos alométricos que integren la variabilidad local de las condiciones climáticas, tipo de suelos, tasas de crecimiento individual y el manejo silvícola (Cole y Ewel, 2006).

Enterolobium cyclocarpum (Jacq.) Griseb. y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. están ampliamente distribuidas en las zonas tropicales de México, se localizan en sitios con vegetación secundaria y se aprovechan para fines maderables, alimentarios,

forrajeros, ornamentales y medicinales (Pineda-Herrera *et al.*, 2016; Viveros-Viveros *et al.*, 2017). En los estados de Jalisco y Michoacán se han establecido plantaciones forestales con ambos taxones nativos y otros introducidos, como *Gmelina arborea* Roxb., y *Tectona grandis* L. f., que han demostrado amplio potencial para su establecimiento en plantaciones forestales comerciales (Muñoz *et al.*, 2009). Sin embargo, actualmente, se desconoce el contenido de biomasa en reforestaciones o plantaciones forestales comerciales de esas cuatro especies; por ello, es necesaria la generación o ajuste de modelos alométricos, a través de variables dasométricas de fácil medición. La determinación de la biomasa, a su vez, permitiría estimar su potencial de almacenamiento de carbono, como una alternativa de mitigación al cambio climático. En este contexto, los objetivos del presente estudio fueron: 1) estimar el contenido de biomasa aérea seca y de carbono en plantaciones forestales de *E. cyclocarpum*, *T. rosea*, *G. arborea* y *T. grandis*; y 2) ajustar ecuaciones alométricas para estimar ambas variables con respecto al diámetro normal.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Las plantaciones forestales de *E. cyclocarpum*, *T. rosea*, *G. arborea* y *T. grandis* se localizan en el municipio La Huerta, Jalisco, en el Sitio Experimental Costa de Jalisco, perteneciente al Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en las coordenadas 19°31'15" latitud norte y 104°32'00" longitud oeste, a una altitud de 298 m. Son plantaciones experimentales mono-específicas con una edad de 12 años y densidad de 1 111 árboles ha⁻¹ para cada especie, y están sujetas a podas. El sitio de estudio presenta lluvias en verano, precipitación media anual de 1 100 mm, temperatura máxima de 34 °C y mínima de 12 °C; el clima corresponde a un clima cálido subhúmedo, y suelo Feozem háplico con pH de 6.7 (Rueda *et al.*, 2014).

Selección y derribo de árboles

Se seleccionaron al azar 15 árboles por especie, que incluyeran todas las categorías diamétricas presentes en las plantaciones. A cada árbol se le midió la altura con clinómetro *Suunto* modelo Pm5/360pc y el diámetro normal (altura a 1.30 m del suelo) con cinta diamétrica *Jackson MS* modelo *Forestry Suppliers Inc.* Posteriormente, se derribaron y se trocearon en secciones del fuste de 0.60 m de longitud; de las cuales, se cortaron rodajas de 5 cm de espesor. Las ramificaciones se separaron del follaje y clasificaron como brazuelos (diámetro mayor a 5 cm) y ramas (diámetro menor o igual a 5 cm). El peso fresco de cada componente (troza, brazuelo, rama, follaje) se determinó con una báscula de reloj *Thor* con capacidad de 20 kg. El número de muestras por componente y total de todos los árboles muestreados por especie, empleados para determinar su peso seco, se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Número de muestras y distribución por componente estructural de cuatro especies forestales tropicales.

Especie	Fuste	Brazuelos	Ramas	Follaje	Total
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	84	14	14	14	126
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	55	15	15	19	104
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	84	19	16	23	142
<i>Tectona grandis</i> L. f.	68	20	31	31	139

Procesamiento de muestras

Las muestras por componente estructural se expusieron al sol durante 30 días para evitar el ataque de hongos y pudrición. Enseguida, se colocaron en un horno de secado eléctrico ORL S-343, a temperatura de 70 °C durante 12 días, excepto el follaje que se secó durante 5 días a una temperatura entre 35–40 °C. Se obtuvo el

peso de las muestras secadas con una báscula digital *Torrey* modelo L-Pcr-40 con precisión en gramos y otra *Advance Baple-400*.

Determinación de biomasa aérea seca por árbol

Se determinó la biomasa seca de cada componente estructural (fuste, brazuelo, ramas y follaje), con la multiplicación del factor resultante de la relación peso húmedo/peso seco de cada muestra por componente. La biomasa aérea seca total por árbol resultó de la suma de la biomasa seca del fuste (trozas) y de la copa (brazuelo, ramas y follaje). Se realizó un análisis de varianza (función aov) para evaluar las diferencias de biomasa aérea seca entre especies, así como una prueba de comparación de medias de *Tukey*, ambos con un nivel de confianza de 95 %, con el programa R, versión 3.4.3 (R Core Team, 2017).

Determinación del carbono por árbol

El contenido de carbono en cada componente se estimó aplicando, a las cuatro especies, un factor de porcentaje de contenido de carbono para el componente follaje = 46.2 %, para las ramas y brazuelos = 46.6 % y para fuste = 48.4 %, determinados para *T. grandis* en plantaciones del estado de Nayarit (Ruiz *et al.*, 2019). El contenido total de carbono por árbol se obtuvo de la suma del carbono del fuste, brazuelo, ramas y follaje en cada especie.

Ajuste de modelos alométricos

Una vez estimada la biomasa aérea seca y carbono promedio por árbol en cada especie, se realizó una regresión lineal [1], potencial [2] y polinomial [3]; en las que se eligió el modelo con el mayor coeficiente de determinación (R^2), el menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y del criterio de información de *Akaike* (AIC), para cada especie. Los modelos ajustados se describen con las ecuaciones:

Modelo lineal: $B = aD + b$ [1]

Modelo potencial: $B = aD^b$ [2]

Modelo polinomial: $B = aD^2 + bD + c$ [3]

Donde:

B = Biomasa (kg)

D = Diámetro normal (cm)

a, b, c = Parámetros de regresión

Determinación de biomasa aérea seca y carbono por hectárea

La biomasa aérea seca y el contenido de carbono por hectárea se estimaron mediante la multiplicación de la densidad de la plantación (1 111 árboles ha⁻¹) por la biomasa promedio por árbol y el contenido de carbono por árbol, respectivamente.

Resultados

Variables dasométricas

El diámetro normal promedio fue estadísticamente mayor en *E. cyclocarpum* (gl.=3, $F=9.881$, $P < 0.05$), *G. arborea* y *T. grandis* tuvieron valores promedio similares; mientras que el menor valor se registró en *T. rosea*. La altura promedio también difirió entre especies (gl.=3, $F= 18.25$, $P < 0.05$), con los valores más altos en *T. grandis* y *G. arborea*, y el más bajo en *E. cyclocarpum*. Los árboles de esta última especie presentaron un diámetro grueso, pero con un porte bajo en altura; los individuos de *T. rosea* fueron delgados y de porte bajo (Cuadro 2).



Cuadro 2. Diámetro normal (cm) y altura total (m) de cuatro especies tropicales en plantaciones forestales en la Costa de Jalisco.

Especie	Diámetro normal (cm)				Altura total (m)			
	Min	Max	Prom	DE	Min	Max	Prom	DE
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	21.5	56.8	33.6*	9.2	7.8	16.5	11.8*	2.3
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	8.2	29.2	19.3	6.1	7.9	16.2	12.7*	2.3
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	12.8	35.5	25.4	6.8	9	21	17.1	3.5
<i>Tectona grandis</i> L. f.	14.8	35	25.3	6.3	13.7	20	17.3	1.9

Min = Mínimo; Max = Máximo; Prom = Promedio; DE = Desviación estándar; * = Especie estadísticamente distinta según prueba de *Tukey*.

Estimación de biomasa aérea seca por árbol

Se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de biomasa aérea seca promedio por árbol entre especies (gl. = 3, $F=3.382$, $P < 0.05$). *T. grandis* presentó la mayor biomasa, seguida por *G. arborea*, *E. cyclocarpum* y *T. rosea*, la cual difirió estadísticamente con respecto a las otras. En *E. cyclocarpum*, 67.2 % de la biomasa se halló en el fuste, 17.2 % en brazuelos, 11.3 % en ramas y 4.3 % en follaje; en *T. rosea*, 58 % correspondió al fuste, 15 % a los brazuelos, 17 % en ramas y 10 % al follaje. En el caso de *G. arborea*, la distribución fue 63.7 % en el fuste, 17.9 % en brazuelos, 11.7 % en ramas y 6.7 % en follaje. Por último, en *T. grandis*, 60.7 % se registró en el fuste, 14.7 % en brazuelos, 18.1 % en ramas y 6.5 % en follaje (Cuadro 3).



Cuadro 3. Biomasa aérea seca promedio por componente de árboles de cuatro especies tropicales en plantaciones de la Costa de Jalisco.

Espece	Fuste kg	Brazuelos kg	Ramas kg	Follaje kg	Biomasa seca kg árbol ⁻¹	Desviación estándar kg árbol ⁻¹
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	133.5	50.4	28.9	8.9	221.0	160
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	59.0	19.6	26.9	10.2	115.8*	144.5
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	145.3	41.0	26.8	14.7	227.9	66.6
<i>Tectona grandis</i> L. f.	165.9	40.3	49.5	17.5	273.2	133.3

* = Espece estadísticamente distinta según prueba de *Tukey*.

Estimación de carbono por árbol

El contenido de carbono siguió el mismo patrón que la biomasa. La especie con registro más alto fue *T. grandis*, seguida por *G. arborea* y *E. cyclocarpum*; mientras que, en *T. rosea* se obtuvo el menor valor de carbono, 58 % menos que *T. grandis*. La estimación de captura de carbono por taxón se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Contenido de carbono en árboles de cuatro especies tropicales en plantaciones de la Costa de Jalisco.

Espece	Mínimo kg árbol ⁻¹	Máximo kg árbol ⁻¹	Desviación estándar kg árbol ⁻¹	Promedio kg árbol ⁻¹
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	35.3	325.9	76.5	105.7
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	6.6	125.2	31.7	54.9*
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	24.1	248.9	69.1	108.7
<i>Tectona grandis</i> L. f.	33.4	229.4	63.6	130.2

* = Espece estadísticamente distinta según prueba de *Tukey*.

Ajuste de ecuaciones alométricas

El modelo potencial presentó el mejor ajuste para la relación entre el diámetro normal y la biomasa tanto de *T. rosea* ($R^2=0.930$), como de *Tectona grandis* ($R^2=0.952$); en cambio, el modelo polinomial se ajustó mejor para *E. cyclocarpum* ($R^2=0.902$) y *G. arborea* ($R^2=0.753$), esta última con el menor coeficiente de determinación. El modelo lineal para ninguna especie fue satisfactorio, pues en general tuvo los menores valores de R^2 y valores superiores de RCME y AIC (Cuadro 5).

Cuadro 5. Modelos para estimar biomasa aérea seca en árboles de cuatro especies tropicales en plantaciones, a partir del diámetro normal.

Especie	Modelo	R^2	RCME	AIC
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Lineal	0.837	62.686	172.712
	Potencial	0.898	49.570	165.670
	Polinomial*	0.902	48.642	167.102
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	Lineal	0.816	27.551	148.050
	Potencial*	0.930	29.069	149.658
	Polinomial	0.819	27.380	149.86
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Lineal	0.705	75.593	166.840
	Potencial	0.658	69.487	164.482
	Polinomial*	0.753	69.225	166.376
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Lineal	0.932	32.084	142.844
	Potencial*	0.952	35.689	145.826
	Polinomial	0.937	32.084	144.844

R^2 = Coeficiente de determinación; RCME = Raíz del cuadrado medio del error; AIC = Criterio de información de Akaike; * = Modelo seleccionado.

Las ecuaciones de contenido de biomasa aérea seca y carbono con el modelo seleccionado por el mejor ajuste de los datos se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 2. Modelos empleados para estimar carbono en biomasa seca aérea de árboles en plantaciones forestales, a partir del diámetro normal.

Especie	Tipo	Variable	Modelo
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Polinomial	Biomasa	$B=0.3729D^2-12.3D+183.92$
		Carbono	$C=0.186D^2-6.583D+101.24$
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	Potencial	Biomasa	$B=0.1959D^{2.1206}$
		Carbono	$C=0.0904D^{2.1299}$
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	Polinomial	Biomasa	$B=0.7075D^2-16.24D+153.36$
		Carbono	$C=0.339D^2-7.84D+73.879$
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Potencial	Biomasa	$B=0.1269D^{2.3477}$
		Carbono	$C=0.0593D^{2.3536}$

B = Biomasa; C = Carbono; D = Diámetro normal.

La relación entre el diámetro normal y la biomasa aérea seca fue de forma potencial (Figura 1). En el caso de *E. cyclocarpum* (Figura 1a), el aumento de la biomasa se aceleró a partir de los 40 cm de diámetro normal, patrón que contrastó con *T. rosea* (Figura 1b), donde el aumento fue más lento. En el caso de las especies introducidas (*G. arborea* y *T. grandis*), el incremento de la biomasa aérea seca se aceleró a partir de los 20 cm de diámetro normal (figuras 1c y 1d).



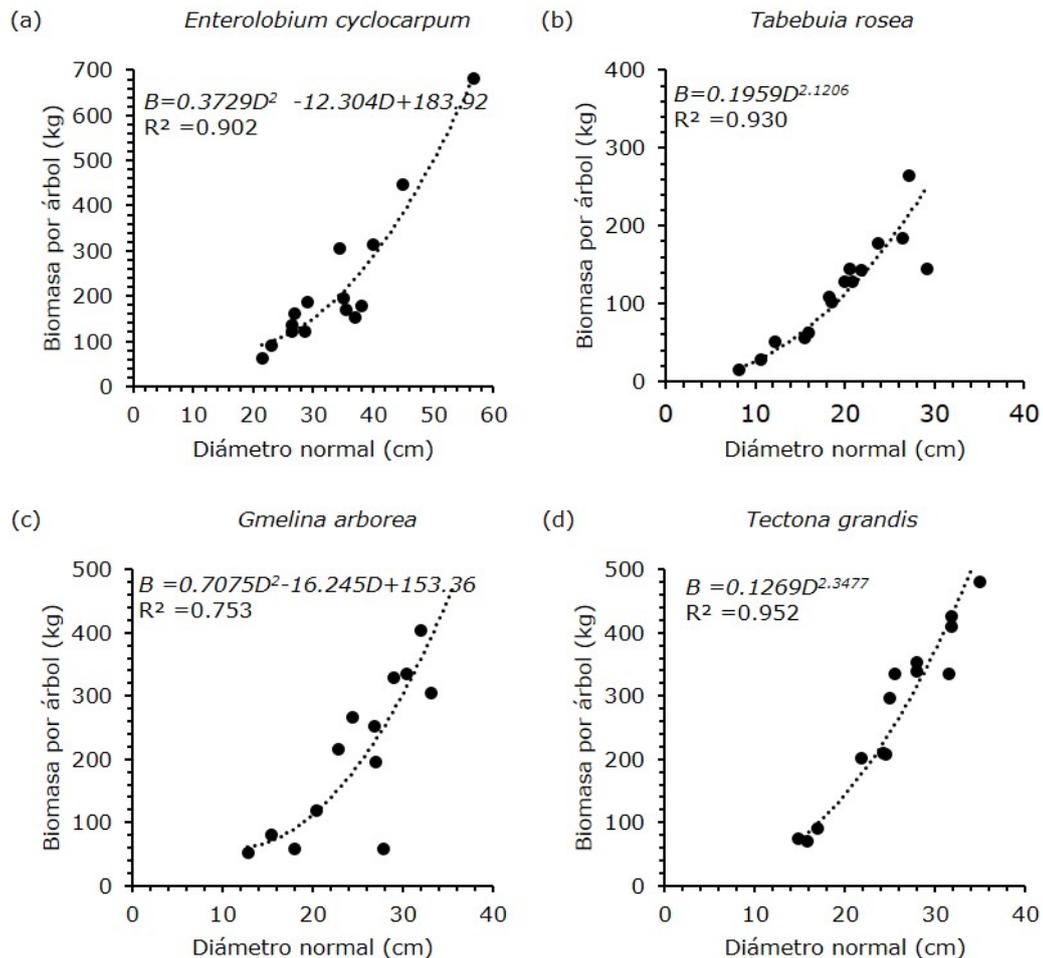


Figura 1. Relación entre el diámetro normal y la biomasa aérea seca en árboles de *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (a); *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (b); *Gmelina arborea* Roxb. (c); y *Tectona grandis* L. f. (d), en plantaciones de la costa de Jalisco.

Determinación de biomasa aérea seca y carbono por hectárea

La biomasa aérea seca y el contenido de carbono por unidad de superficie fueron mayores en la plantación de *T. grandis*, seguida por *G. arborea*, *E. cyclocarpum* y por *T. rosea* (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estimación de biomasa aérea seca y carbono de cuatro especies tropicales en plantaciones forestales de la costa de Jalisco.

Especie	Biomasa	Desviación	Carbono	Desviación
	promedio	estándar	promedio	estándar
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	246.4	177.7	117.5	85.0
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	128.6	74.0	61.1	35.2
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	253.1	160.5	120.8	76.8
<i>Tectona grandis</i> L. f.	303.4	148.1	144.6	70.7

Discusión

El contenido de biomasa aérea seca fue superior en las especies introducidas (*T. grandis* y *G. arborea*); aunque la nativa, *E. cyclocarpum*, también mostró un alto contenido de biomasa, lo cual indica que los tres taxones tienen una gran capacidad de adaptación y desarrollo en las condiciones edáficas y climáticas de prevalecientes en la zona tropical de estudio (Muñoz *et al.*, 2009). En el caso de *T. rosea*, es posible que tenga una menor tasa de crecimiento debido a su fisiología, en comparación con los otros taxa, al menos durante los primeros 12 años, con árboles delgados y bajos, lo que podría relacionarse con nutrientes limitados o condiciones subóptimas, para los cuales es muy sensible (Pacheco *et al.*, 2007).

Las cuatro especies evaluadas en este estudio presentaron valores 90 % mayores de biomasa aérea seca que los estimados en plantaciones tropicales de la misma edad, con *Cedrela odorata* L. (34 kg árbol⁻¹) y *Swietenia macrophylla* King (26 kg árbol⁻¹) (Rueda *et al.*, 2014). Además, dichos registros fueron superiores a los señalados para especies del bosque mesófilo, como *Alnus glabrata* Fernald. (48.4 kg árbol⁻¹), *Quercus peduncularis* Neé. (72.7 kg árbol⁻¹), y *Liquidambar macrophylla* Oerst. (77 kg árbol⁻¹) (Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

La mayor proporción de biomasa aérea seca de los cuatro taxones evaluados se determinó en el fuste, entre 58 y 67 %, patrón similar al citado para *C. odorata* (74.7 %) y *S. macrophylla* (47.6 %) (Rueda *et al.*, 2014), pero menor que en *Quercus laurina* Humb. *et.* Bonpl. (83 %), *Q. crassifolia* Humb. *et.* Bonpl. (82 %) y *Pinus patula* Schltdl. *et.* Cham. (89 %), especies de clima templado; generalmente, con menos ramificaciones (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Ruiz-Aquino *et al.*, 2014). El efecto de las podas puede incrementar el porcentaje de biomasa en el fuste y alcanzar hasta 90 %, como se observó en *T. grandis* (López *et al.*, 2018); por lo que el manejo de las plantaciones de este estudio podría tener efectos sobre la distribución de la biomasa.

La relación entre la biomasa aérea seca y el diámetro normal se ajustó a modelos potenciales (*T. rosea* y *T. grandis*) y polinomiales (*E. cyclocarpum* y *G. arborea*), lo cual es común en especies tropicales (Rueda *et al.*, 2014; Aquino-Ramírez *et al.*, 2015) y templadas (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014). Las primeras tres presentaron una R^2 superior a 0.9; valores similares a *E. cyclocarpum* ($r^2= 0.96$) en Tamaulipas (Foroughbakhch *et al.*, 2006), *T. grandis* ($r^2= 0.99$) en Nayarit (Ruiz *et al.*, 2019) y *T. rosea* ($r^2= 0.95$) en Panamá (Mayoral *et al.*, 2017). Para *G. arborea* fue menor al documentado en plantaciones de Costa Rica ($r^2= 0.82$) (Rodríguez *et al.*, 2018). La medición del diámetro normal representa un indicador confiable para estimar el contenido de biomasa aérea seca y prescindir del método destructivo para obtener dicha información (Méndez-González *et al.*, 2016).

Los resultados de este estudio sugieren que las especies introducidas *T. grandis* y *G. arborea* tienen un alto potencial de almacenamiento de carbono, igual que *E. cyclocarpum* (nativa). El carbono almacenado fue mayor que el de taxa del bosque tropical caducifolio (94 Mg ha⁻¹) (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008), pero menor al de un bosque de coníferas (376 Mg ha⁻¹) (Bolaños *et al.*, 2017). Por tanto, el establecimiento de plantaciones forestales comerciales de *G. arborea*, *T. grandis* y *E. cyclocarpum* (también de restauración) en la zona tropical de México representa una alternativa importante para el almacenamiento de carbono, y así contribuir a la mitigación del calentamiento global.

Con respecto a las especies introducidas, se requiere continuar con investigaciones sobre su adaptación a las diversas condiciones agroclimáticas, así como en aspectos relativos a la detección de plagas y enfermedades que pudiesen presentarse a lo largo del turno.

Conclusiones

El contenido de biomasa aérea seca es variable entre las especies evaluadas a los 12 años. *T. grandis*, *G. arborea* y *E. cyclocarpum* son las de mejor rendimiento. El mayor contenido de biomasa se registra en el fuste, lo cual es característico de árboles de clima tropical y templado. Las ecuaciones alométricas ajustadas pueden aplicarse en especies similares, especialmente, para la estimación del carbono almacenado. Este estudio confirma que la medición del diámetro normal constituye una opción fácil y fiable para estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono a través de modelos polinomiales y potenciales. Las cuatro especies son una importante alternativa para contribuir a la captura de carbono de manera significativa. Es importante investigar el potencial de almacenamiento de carbono en otras plantaciones forestales tropicales o templadas, para coadyuvar a la mitigación del calentamiento global a largo plazo.

Agradecimientos

Al personal del Sitio Experimental Costa de Jalisco, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

J. Trinidad Sáenz Reyes: diseño en campo, redacción y revisión del manuscrito; Agustín Rueda Sánchez: diseño y muestreo en campo, redacción del manuscrito; Juan de Dios Benavides Solorio: diseño y muestreo en campo; H. Jesús Muñoz Flores: redacción y revisión del manuscrito; David Castillo Quiroz: redacción y revisión del manuscrito; Jesús Eduardo Sáenz Ceja: análisis estadístico y redacción del manuscrito.

Referencias

Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/225> (2 de agosto de 2020).

Aquino-Ramírez, M., A. Velázquez-Martínez, J. F. Castellanos-Bolaños, H. De Los Santos-Posadas y J. D. Etchevers-Barra. 2015. Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia* 49(3): 299-314.

<https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1148>

(6 de julio de 2020).

Bolaños G., Y., M. A. Bolaños G., F. Paz P. y J. I. Ponce P. 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.

Casiano-Domínguez, M., F. Paz-Pellat, M. Rojo-Martínez, S. Covaleda-Ocon. y D. R. Aryal. 2018. El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques* 24: e2401894.

Doi:10.21829/myb.2018.2401894.

- Cole, T. G. and J. J. Ewel. 2006. Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management* 229(1-3):351-360. Doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.017.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1):25-34. Doi:10.21829/myb.2007.1311233.
- Foroughbakhch, R., M. A. Alvarado-Vázquez, J. L. Hernández-Piñero, A. Rocha-Estrada, M. A. Guzmán-Lucio and E. J. Treviño-Garza. 2006. Establishment, growth and biomass production of 10 tree Woody species introduced for reforestation and ecological restoration in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management* 235(1-3):191-201. Doi: 10.1016/j.foreco.2006.08.012.
- Hernández-Ramos, J., H. M. De los Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, A. Peduzzi y O. Carrero. 2017. Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia* 51(8):921-938. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1336> (2 de agosto de 2020).
- López-Reyes, L. Y., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi, J. Zavala-Cruz, A. Gómez-Guerero y S. Posada-Cruz. 2016. Carbono almacenado en la biomasa de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosques* 22(3):49-60. Doi:10.21829/myb.2016.2231456.
- López, H. G., E. E. Vaidés y A. Alvarado. 2018. Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* 42(1):137-153. Doi:10.15517/RAC.V42I1.32201.

Mayoral, C., M. van Breugel, A. Cerezo and J. S. Hall. 2017. Survival and growth of five Neotropical timber species in monocultures and mixtures. *Forest Ecology and Management* 403:1-11. Doi: 10.1016/j.foreco.2017.08.002.

Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrte, M. A. Capó-Arteaga y J. A. Nájera-Luna. 2016. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl. en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4):479-491. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/894> (2 de agosto de 2020).

Montero M., M. y F. Montagnini. 2005. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 45:112-119 https://www.researchgate.net/publication/284401254_Modelos_alometricos_para_la_estimacion_de_biomasa_de_diez_especies_nativas_en_plantaciones_en_la_region_Atlantica_de_Costa_Rica/link/59e6506caca2721fc227a595/download (16 noviembre de 2020).

Muñoz F., H. J., V. M. Coria Á., J. J. García S. y M. Balam C. 2009. Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 34(106):61-87. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/684> (5 de julio de 2020).

Pacheco E., F. C., A. Aldrete, A. Gómez G., A. M. Fierros G., V. M. Cetina-Alcalá y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3):251-254. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf> (3 de julio de 2020).

- Pineda-Herrera, E., J. I. Valdez-Hernández y C. P. Pérez-Olvera. 2016. Crecimiento en diámetro y fenología de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en Costa Grande, Guerrero, México. *Acta Universitaria* 26(4):19-28. Doi: 10.15174/au.2016.914.
- R Core Team. 2017. R project 4.3.4. <https://www.rproject.org/> (16 de febrero de 2019).
- Raven, J. A. and A. J. Karley. 2006. Carbon sequestration: Photosynthesis and subsequent processes. *Current Biology* 16(5):165-167. Doi: 10.1016/j.cub.2006.02.041.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, J. Meza-Rangel, O. Aguirre-Calderón y R. Razo-Zarate. 2008. Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2):215-222.
https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Rodri_Laguna/5.pdf (3 de julio de 2020).
- Rodríguez, M., D. Arias, J. C. Valverde y D. Camacho. 2018. Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* L. f. en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana* 15(1):61-68. Doi: 10.18845/rfmk.v15i1.3723.
- Rueda S., A., A. Gallegos R., D. González E., J. A. Ruiz C., J. D. Benavides S., E. López A. y M. Acosta M. 2014. Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(25):8-17. Doi: 10.29298/rmcf.v5i25.300.
- Ruiz-Aquino, F., J. I. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortiz, A. Romero-Manzanares y M. E. Fuentes-López. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques* 20(2):33-48. Doi: 10.21829/myb.2014.202162.

Ruiz B., B. A., E. Hernández Á., E. Salcedo P., R. Rodríguez M., A. Gallegos R., E. Valdés V. y R. Sánchez H. 2019. Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L. f. en México. *Colombia forestal* 22(2):15-29. Doi: 10.14483/2256201X.13874.

Rytter, R. 2012. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 36:86-95. Doi: 10.1016/j.biombioe.2011.10.012.

Soriano-Luna, M. Á., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49(4): 423-438.

<https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2015/may-jun/art-6.pdf>

(5 de julio de 2020).

Viveros-Viveros, H., K. Quino-Pascual, M. V. Velasco-García, G. Sánchez-Viveros y E. Velasco B. 2017. Variación geográfica de la germinación en *Enterolobium cyclocarpum* en la costa de Oaxaca, México. *Bosque* 38(2):317-316.

Doi: 10.4067/S0717-92002017000200009.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.