



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.791>

Artículo

Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales

Allometric equations for estimating biomass and aerial carbon from *Cedrela odorata* L. in forest plantations

Juan de Dios Benavides Solorio^{1*}, Octavio Torres García², José Germán Flores Garnica¹, Miguel Acosta Mireles³ y Agustín Rueda Sánchez¹

Abstract

Several allometric equations were generated for biomass and carbon content for *Cedrela odorata* trees. Twenty-seven trees were selected from tree different forest plantations in the states of Jalisco and Colima. The best trees were carefully chosen for felling, partitioning, and measuring in the field. Samples from the stem, branches and foliage were collected and sent to the laboratory in order to estimate their biomass and carbon content. The results from each sample were used to the different sections of the tree. Some models were tested, and the final potential model used was $Y=b \cdot x^k$; the allometric biomass equation is $AB=0.00341 \cdot ND^{3.38248}$, and for carbon content is $CC=0.001562 \cdot DN^{3.389696}$; where: AB is the aboveground biomass (kg); and CC is the aboveground carbon content (kg), ND is the normal diameter (cm). Both equations exhibited a good fit with an R^2 of 0.978, and the tests of normality, heteroscedasticity and independence, show good confidence and guarantee of the models developed. The results suggest that the equations generated allow estimating the aerial biomass and the carbon concentration based on the normal diameter.

Key words: Cedar, normal diameter, heteroscedasticity, potential model, forest plantations, dry weight.

Resumen

A partir de 27 árboles de tres plantaciones forestales de *Cedrela odorata* ubicadas en la región costera de Jalisco y Colima, se generaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea y la concentración de carbono. Se seleccionaron los individuos mejor conformados, los cuales fueron cortados y medidos en campo, además se obtuvo el peso húmedo total del árbol por secciones. Para calcular la biomasa aérea y el carbono de los árboles, de cada sección (fuste, ramas y follaje) se tomaron muestras de madera y hojas, las cuales se llevaron a laboratorio para determinar su peso seco y concentración de carbono. Los datos del análisis de las muestras se extrapolaron a la sección y componente estructural correspondiente; mediante la adición de los valores resultantes, se estimó la concentración total de biomasa y carbono por individuo. Se probaron varios modelos, pero al final se ajustaron al modelo potencial: $Y=b \cdot X^k$, donde Y (BS : biomasa aérea en kg; CC : concentración de carbono en kg) es la variable respuesta y X (DN : diámetro normal en cm) la variable predictora. Las ecuaciones alométricas generadas fueron: $BS=0.00341 \cdot DN^{3.38248}$, para estimar la biomasa aérea, y $CC=0.001562 \cdot DN^{3.389696}$, para la concentración de carbono; ambas con un coeficiente de determinación ajustado $R^2_a=0.978$. Adicionalmente, para cada una de ellas, se realizaron las pruebas de normalidad, heteroscedasticidad e independencia, cuyos resultados validan y garantizan la confiabilidad de los modelos obtenidos. Los resultados sugieren que las ecuaciones generadas permiten estimar la biomasa aérea y la concentración de carbono con base en el diámetro normal.

Palabras clave: Cedro, diámetro normal, heteroscedasticidad, modelo potencial, plantaciones forestales, peso seco.

Fecha de recepción/Reception date: 4 de junio de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de septiembre de 2020

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

²Consultor especializado en Proyectos Forestales. México.

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

*Autor por correspondencia; correo-e: benavides.juandedios@inifap.gob.mx

Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI), como el bióxido de carbono (CO₂), son el principal GEI antrópico que afecta el balance radiativo de la Tierra. La fuente más importante de emisiones de CO₂ es la combustión de combustibles fósiles, la segunda incluye la deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (IPCC, 2007). Para revertir el proceso de concentración de CO₂, las plantaciones forestales son una alternativa para la fijación de carbono, ya que son ecosistemas cuyo manejo se orienta a maximizar el volumen en madera por unidad de área, lo cual les confiere una elevada capacidad de almacenamiento de carbono (González *et al.*, 2019); y si además, la madera se transforma en productos duraderos, ese carbono fijado permanecerá en las estructuras por un período mayor (Ordóñez *et al.*, 2001).

Aunque diversos estudios denotan diferentes concentraciones de carbono según la especie y tejido del árbol, los cuales varían en un intervalo de 43 a 58 % de la biomasa (IPCC, 2007), generalmente, el factor sugerido es de 0.50 (IPCC, 2007). Sin embargo, para efectos de cuantificación en proyectos de captura de C sujetos a financiamiento, se recomienda emplear concentraciones específicas de carbono, para lo cual se requiere tener información diferenciada por especie y componente arbóreo (Gayoso y Guerra, 2005).

Los modelos alométricos constituyen un método indirecto de uso práctico para estimar la biomasa aérea de los árboles (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010); asimismo, los que se basan en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas sobre el contenido de biomasa (Gómez-Díaz *et al.*, 2011); por lo que son una herramienta valiosa para predecir la biomasa y el carbono de diversas especies arbóreas (Návar, 2010). No obstante que se han desarrollado ecuaciones de biomasa para bosques tropicales, templados y algunos tipos de vegetación semiárida (Návar *et al.*, 2001; Rojas-García *et al.*, 2015), en México existe muy poca información sobre la estimación de la biomasa en plantaciones forestales.

Con base en lo anterior, el objetivo general del presente estudio fue generar modelos alométricos de utilidad práctica y confiabilidad estadísticamente válida, que permitan estimar, dentro del ámbito de aplicación recomendado, tanto la cantidad de biomasa aérea como la capacidad para almacenar carbono en árboles de diferentes diámetros de *Cedrela odorata* L.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en tres plantaciones forestales de la especie *Cedrela odorata* (Figura 1): 1) Sitio Experimental Costa de Jalisco, municipio La Huerta, Jalisco (19°31'15" N y 104°32'00" O; 298 msnm), con predominancia de suelos tipo Phaeozem háplico, de textura media; y el clima corresponde al tipo $Aw_1(w)$ con precipitaciones de 1 012 mm anuales; 2) Predio El Molino, municipio Casimiro Castillo, Jalisco (19°32'05" N y 104°26'20" O; 412 msnm); los suelos son del tipo Cambisol dístico de textura media; clima del tipo $Aw_2(w)$ con una precipitación media anual de 1 496 mm; y 3) Campo Experimental Tecomán, municipio Tecomán, Colima (18°58'01" N y 103°50'32" O; 60 msnm); el suelo se clasifica como Calcisol sálico de textura media y prevalece un clima del tipo $BS_1(h')w(w)$, con 790 mm de precipitación media anual (Ruiz *et al.*, 2012; INEGI, 2016). El tipo de vegetación natural predominante en el área de influencia de los predios corresponde al de selva mediana subcaducifolia (VSa/SMS y VSA/SMS).



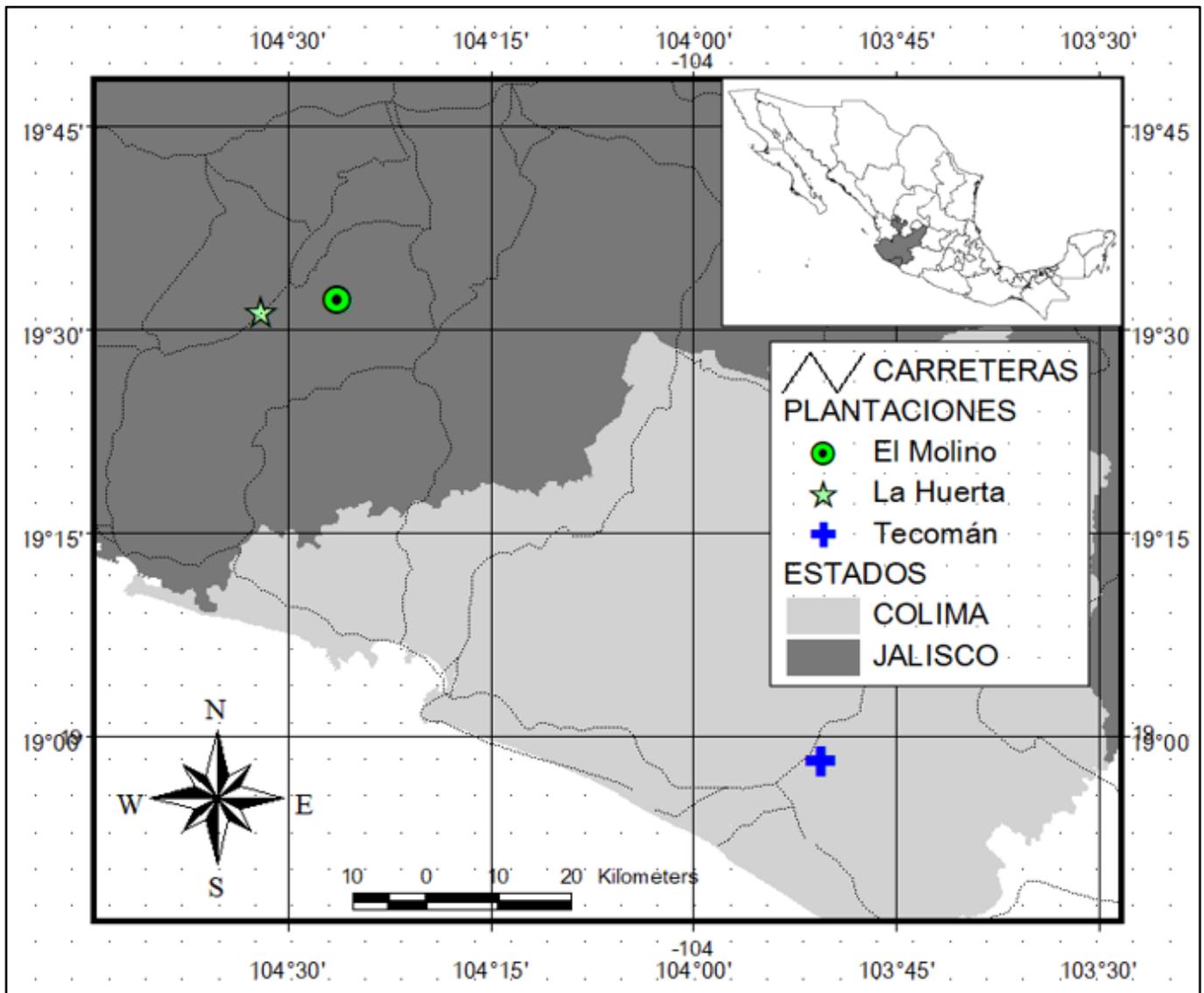


Figura 1. Ubicación de las tres plantaciones forestales de *Cedrela odorata* L.

Selección de árboles muestra

En la selección de los individuos que conformaron la muestra solo se consideraron los árboles marcados para ser derribados en los aclareos que forman parte del manejo de las plantaciones. El proceso selectivo inició con la clasificación del arbolado por clases diamétricas de 5 cm. Dado que no se trataba de un muestreo, se identificaron los individuos sin deformidades y sanos, entre los cuales se seleccionaron (aleatoriamente) 27 árboles, que cubrieron, en forma proporcional, el intervalo de

clases diamétricas presentes en las tres plantaciones (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014). Con los árboles aún en pie, se les midió con cinta diamétrica (*Forestry Suppliers*, 5 m) el diámetro normal (DN en cm). El derribo direccional del individuo se realizó con una motosierra. Para obtener su altura total (AT, en m), con un flexómetro (Pretul, cinta métrica metálica de 5 m) se determinó la altura del tocón y con un longímetro (*Truper*[®], cinta métrica de fibra de vidrio de 30 m) se midió longitudinalmente el árbol, desde la base del fuste hasta el ápice de la copa, también se registró la altura del fuste limpio y su longitud total.

Muestreo de biomasa aérea

La metodología empleada para muestrear la biomasa aérea fue la descrita por Díaz *et al.* (2007) y Figueroa-Navarro *et al.* (2010). Con el propósito de facilitar su aprovechamiento y manejo posterior a su derribo, los componentes aéreos del árbol (fuste, ramas y follaje) fueron separados y seccionados conforme a lo siguiente: 1) trozas de 1.5 a 2.5 m de largo (base del fuste y tocón); 2) bolos de 1.0 a 1.25 m de largo (parte superior del fuste y ramas gruesas); 3) leñas de 1.0 m de largo (ramas delgadas y punta del fuste); y 4) follaje de la parte baja, media y alta de la copa (hojas, ramillas finas, flores y frutos).

El peso húmedo de los componentes estructurales se registró en campo y en forma separada por componente; para trozas y bolos se obtuvo el peso de cada sección, a la cual se le tomó una muestra (rodaja de 5 cm de ancho); las leñas se acomodaron y pesaron por cargas, de cada una se extrajeron al azar de dos a seis muestras (segmentos de 10 cm de largo); mientras que para el follaje, el material recolectado se pesó en tres porciones (parte baja, media y alta de la copa), de las cuales se obtuvo al azar una muestra (0.1 a 1.0 kg). El pesaje de las secciones se hizo con una báscula electrónica (*Torrey CRS-500*) con capacidad de 500 kg \pm 0.1 kg; para las muestras se utilizó una báscula electrónica (*Torrey PCR-20*) con capacidad de 20 kg \pm 0.01 kg. El peso húmedo del tocón se estimó de la siguiente manera: su

volumen se calculó con la fórmula del cilindro y se asumió una densidad verde igual a la presente en la primera troza.

Determinación de biomasa aérea

Una vez obtenido en campo el peso húmedo, el material recolectado se trasladó al laboratorio para su deshidratación hasta peso constante en una estufa electrónica (*Felisa*, Fe-291ad); las muestras de madera se secaron a 70 °C (12-15 días) y las de follaje a 35-40 °C (5 días); el peso seco se registró con una precisión de 1.0 g. El peso seco de cada sección se estimó multiplicando su peso húmedo por el factor resultante de la relación peso seco:peso húmedo de su respectiva muestra. La biomasa aérea total del árbol y sus componentes estructurales se calculó sumando el peso seco de sus secciones correspondientes (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2013; Cutini *et al.*, 2013; Rueda *et al.*, 2014).

Determinación de la concentración de carbono

Posterior a la determinación del peso seco, se tomaron las muestras de los componentes correspondientes a cinco árboles seleccionados al azar; de cada una se extrajo una submuestra de 100 g, las cuales se molieron y enviaron al laboratorio para determinar su concentración de carbono en un equipo *LECO TruSpec Micro*, el que utiliza la combinación de un sistema de gas portador de flujo continuo y de un sistema de luz infrarroja. Con los resultados del análisis, para cada componente se obtuvo un factor de conversión de biomasa a carbono (FC). La concentración de carbono de los componentes se estimó con la siguiente expresión:

$$CCC_i = BC_i \cdot FC_i$$

Donde:

CCC_i = Concentración de carbono del componente i (trozas, bolos, leñas y follaje; en kg)

BC_i = Biomasa del componente i (kg)

FC_i = Factor de conversión del componente i

La concentración de carbono total por árbol resultó de sumar la concentración de carbono de sus componentes.

Ajuste de modelos

Los modelos alométricos se basan para estimar la biomasa solo en el diámetro normal (Návar *et al.*, 2004; Avendaño *et al.*, 2009); sin embargo, diversos autores recomiendan incluir la altura, ya que se reduce el error estándar, se evitan sobreestimaciones y se mejora el ajuste de los modelos (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Ruíz *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2012).

Se probaron modelos lineales y no lineales citados en la literatura especializada para relacionar la biomasa aérea (BA) con las variables diámetro normal (DN) y altura total (AT) o ambas ($DN \cdot AT$; $DN^2 \cdot AT$). De acuerdo al análisis realizado, el mejor ajuste se obtuvo con el modelo potencial expresado en su forma normal como:

$$BA = \beta_0(DN)^{\beta_1}$$

Donde:

BA = Biomasa aérea (kg)

DN = Diámetro normal (cm)

β_0 y β_1 = Parámetros estimados de la función

Este modelo es uno de los más utilizados para determinar biomasa aérea (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Gayoso *et al.*, 2002). Dicha preferencia obedece a que expresa una proporcionalidad de los incrementos relativos entre dos dimensiones del árbol y es ampliamente consistente para distintas formas de crecimiento (Gayoso *et al.*, 2002).

Además de obtener la ecuación para determinar la biomasa aérea total del árbol, se ajustó una ecuación para la biomasa de sus componentes estructurales. Para estimar la concentración de carbono en la biomasa aérea del árbol, con el mismo modelo, se ajustó una ecuación que correlaciona la concentración de carbono con el diámetro normal del árbol.

El ajuste, análisis estadístico y diagnóstico de las ecuaciones se hicieron mediante los procedimientos *MODEL* y *NLIN* en el *software* SAS (SAS Institute Inc., 2011). Los criterios para calificar la bondad de ajuste del sistema que mejor explican la variabilidad de los datos de biomasa se basan en un análisis numérico y de gráficos de los residuales (Gómez-Díaz *et al.*, 2011). En el caso numérico se emplearon estadísticos de uso frecuente en biometría, como el coeficiente de determinación ajustado (R^2_a), la raíz del cuadrado medio del error (*RCME*), el coeficiente de variación (*CV*) y la significancia de los parámetros de cada ecuación (Álvarez *et al.*, 2005; Rojo *et al.*, 2005); asimismo, para validar la confiabilidad de los resultados de la ecuación seleccionada se verificaron analíticamente los supuestos de la regresión: normalidad (pruebas de *Shaphiro-Wilk*, *Kolmogorov-Smirnov*, *Cramer-von Mises* y *Anderson-Darling*), independencia (contraste *d* de *Durbin-Watson*) y homocedasticidad (pruebas de *White* y *Breusch-Pagan*) de los datos (Fonseca *et al.*, 2011).



Resultados y Discusión

Estimación de la biomasa de árboles

El diámetro normal de los árboles muestreados varió en un intervalo de 4.0 a 28.0 cm; y su biomasa aérea de 2.42 a 275.53 kg, con una media de 41.06 kg y desviación estándar de 53.68 kg. La distribución de la biomasa aérea del árbol se indica en el Cuadro 1; se aprecia que la mayor proporción promedio correspondió al fuste (trozas y bolos), con 71.37 %; le continúan las ramas (leñas) y el follaje con 21.96 y 6.67 %, respectivamente. El porcentaje promedio de las trozas (fuste), donde se concentra la mayor proporción de biomasa, fue similar al citado para árboles de latifoliadas (49.1 %) (Soriano, 2014; Soriano-Luna *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Porcentaje de biomasa aérea por clase diamétrica y componente.

Biomasa aérea (%)					
Categoría diamétrica (cm)	Trozas (1)	Bolos (2)	Leñas (3)	Follaje (4)	Total madera (1+2+3)
5	53.32	0.00	20.40	26.28	73.72
10	66.18	7.35	17.47	8.99	91.01
15	58.83	17.02	17.51	6.64	93.36
20	69.55	14.23	9.16	7.06	92.94
25	-	-	-	-	-
30	49.27	18.07	26.50	6.16	93.84
Promedio ponderado	54.68 %	16.69 %	21.96 %	6.67 %	93.33 %

La ecuación para estimar la biomasa aérea de *C. odorata*, quedó expresada como:

$$BA = 0.00341 \cdot DN^{3.38248} \quad (1)$$

Donde:

BA = Biomasa aérea (kg)

DN = Diámetro normal (cm)

La tendencia exponencial de la ecuación coincide con lo documentado para *Pinus hartwegii* Lindl. (Carrillo *et al.*, 2016). El análisis de la ecuación mostró los siguientes indicadores estadísticos: coeficiente de determinación ajustado, $R^2_a=0.9787$; coeficiente de variación, $CV=390.449$; y raíz del cuadrado medio del error, $RCME=7.487$. En la Figura 2 se presenta el diagrama de dispersión y la relación entre las variables *DN* y *BA* de los árboles.



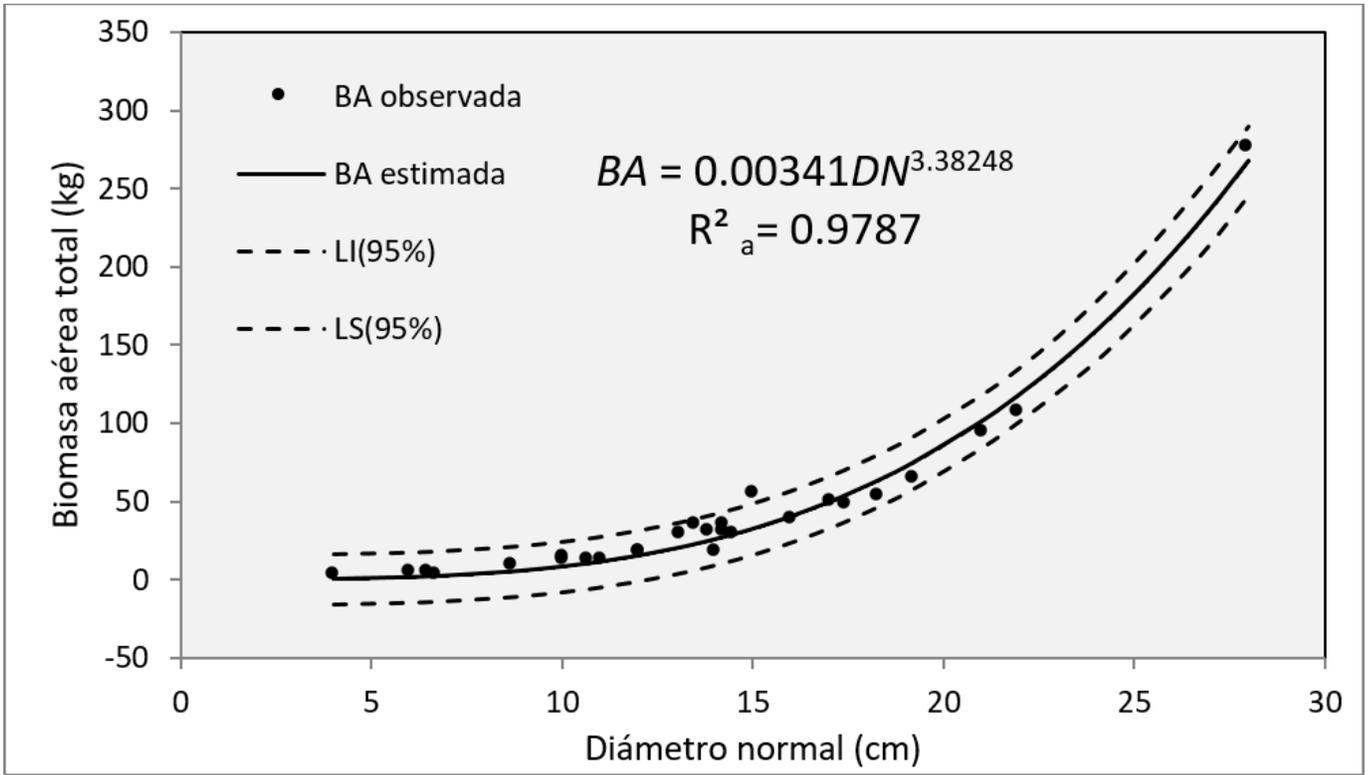


Figura 2. Diagrama de dispersión y relación entre diámetro normal y biomasa aérea total de árboles de *Cedrela odorata* L.

Las diferentes pruebas empleadas para el diagnóstico analítico del modelo demostraron que se verifican los supuestos de la regresión, lo que validó los análisis estadísticos realizados. Los valores de los estadísticos se presentan en el Cuadro 2.



Cuadro 2. Estadísticos de las pruebas realizadas (95 % de confiabilidad).

Supuesto	Prueba	Estadístico	Valor-p		
Normalidad	<i>Shapiro-Wilk</i>	<i>W</i>	0.94268	Pr < <i>W</i>	0.1419
	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>	<i>D</i>	0.15429	Pr > <i>D</i>	0.0958
	<i>Cramer-von Mises</i>	<i>W</i> ²	0.11319	Pr > <i>W</i> ²	0.0744
	<i>Anderson-Darling</i>	<i>A</i> ²	0.63713	Pr > <i>A</i> ²	0.0893
Homocedasticidad	<i>White</i>	<i>nR</i> ² <i>aux</i>	3.91	Pr > <i>Chi</i> ²	0.5630
	<i>Breusch-Pagan</i>	<i>0.5*SCEaux</i>	2.49	Pr > <i>Chi</i> ²	0.2885
Independencia	Contraste <i>d</i> de <i>Durbin-Watson</i>	<i>d</i>	1.6996		

En referencia al supuesto de normalidad, las cuatro pruebas indicaron que los residuos tienen una distribución normal (valor-*p* > 0.05); para el de independencia, el contraste *d* de *Durbin-Watson* ($d_U < 1.6996 < 4 - d_U$) evidenció que los residuos no están correlacionados; y para el de homocedasticidad, tanto la prueba de *White* ($Chi^2 > 3.91$; valor-*p* > 0.05), como la prueba de *Breusch-Pagan* ($Chi^2 > 2.49$; valor-*p* > 0.05) demostraron que no hay problemas de heterocedasticidad. Se ajustó el mismo modelo y se generó una ecuación para cada componente, cuyos parámetros y estimadores de regresión se resumen en el Cuadro 3.



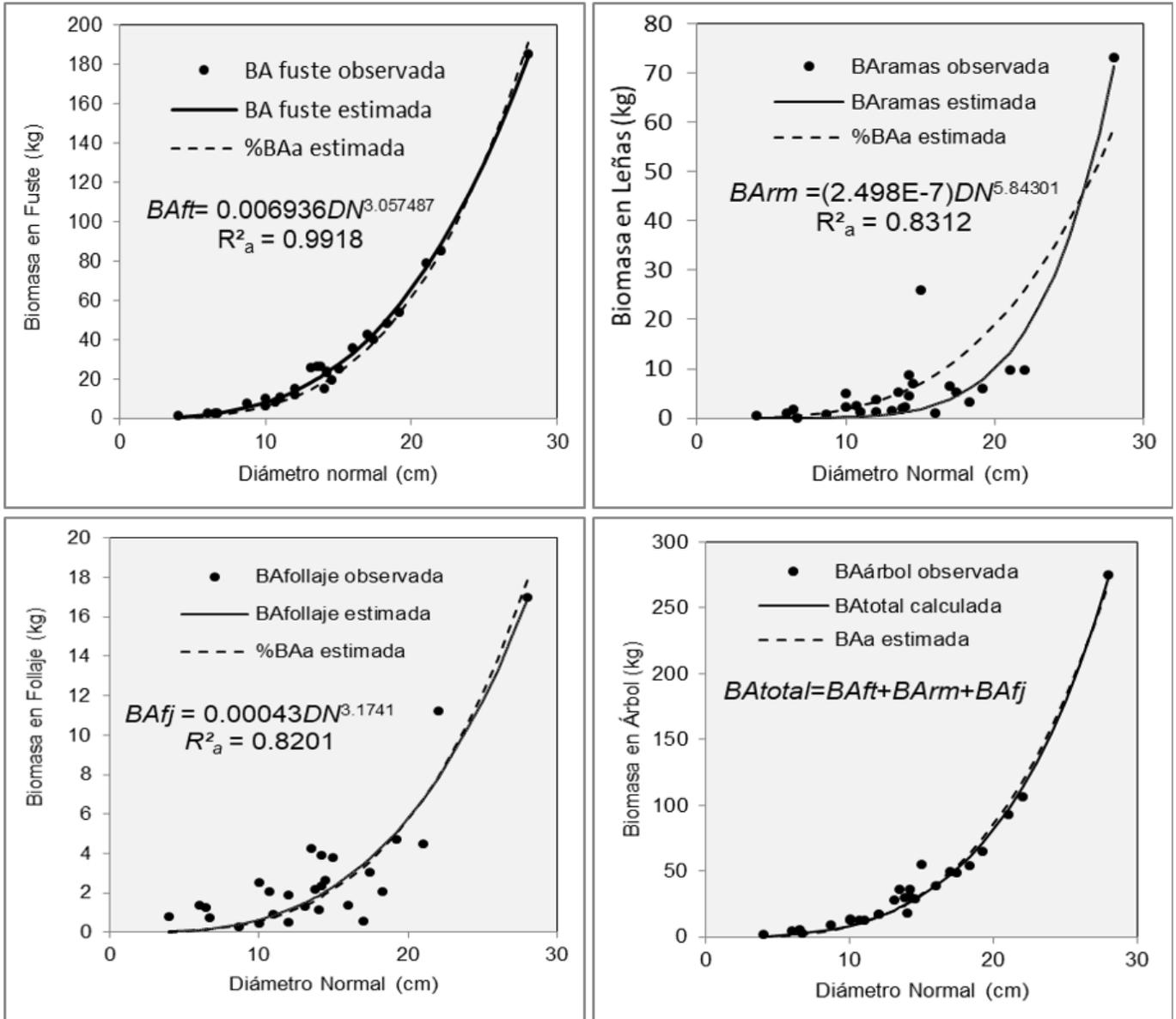
Cuadro 3. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa por componente estructural.

Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor t	Pr > t	Raíz CME	R ² _a	W	Pr < W
<i>Fuste (BAft)</i>								
β_0	0.006936	0.00128	5.43	<0.0001	3.4223	0.9918	0.98	0.8686
β_1	3.057487	0.0584	52.34	<0.0001				
<i>Ramas (BArm)</i>								
β_0	2.498E-7	6.265E-7	0.40	0.6935	5.8082	0.8312	0.72	<0.0001
β_1	5.843096	0.7601	7.69	<0.0001				
<i>Follaje (BAfj)</i>								
β_0	0.00043	0.000404	1.06	0.2977	1.5123	0.8201	0.98	0.8943
β_1	3.174131	0.2969	10.69	<0.0001				

$$BA_{total} = 0.006936(DN)^{3.057} + 0.000000249(DN)^{5.843} + 0.00043(DN)^{3.174}$$

BA_{total} = Biomasa aérea total estimada con el modelo 1; $BAft$ = Biomasa en fuste; $BArm$ = Biomasa en ramas; $BAfj$ = Biomasa en follaje; BA_{total} = Biomasa aérea total calculada mediante la suma de la biomasa estimada para cada uno de sus componentes.

Los diagramas de dispersión y la relación del diámetro normal con la biomasa por componente de *C. odorata* se ilustran en la Figura 3; se observa que el mejor ajuste del modelo correspondió al fuste (biomasa de trozas y de bolos), con un $R^2_a=0.9918$. Sin embargo, los valores de biomasa total fueron de aproximadamente una tercera parte de lo señalado para especies como *Alnus acuminata* Kunth (Díaz-Ríos *et al.*, 2016) y *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. *et Cham.* (Avendaño *et al.*, 2009). Por el contrario, la biomasa total coincide con lo citado para *Pinus hartwegii* (Carrillo *et al.*, 2016).



$BAtotal$ = Biomasa aérea total estimada con el modelo 1; $BAft$ = Biomasa en fuste; $BArm$ = Biomasa en ramas; $BAfj$ = Biomasa en follaje; $BAtotal$ = Biomasa aérea total calculada mediante la suma de la biomasa estimada para cada uno de sus componentes.

Figura 3. Relación entre diámetro normal y biomasa aérea por componente estructural.

En los diagramas de la Figura 3, además de la línea de tendencia obtenida mediante el ajuste del modelo potencial para la biomasa de cada componente (línea continua), se trazó la línea de tendencia resultante de la partición de biomasa (línea punteada) indicada en el Cuadro 1. El gráfico correspondiente a la biomasa del fuste, al igual que en el del follaje, no se aprecian diferencias significativas en el comportamiento de ambas tendencias; mientras que, para las ramas las diferencias son más evidentes, lo cual pudiera deberse a los problemas de normalidad en los datos de dicho componente.

Asimismo, en el gráfico correspondiente a la biomasa aérea total, tanto la estimada con la ecuación 1 como la calculada mediante la suma de la biomasa de sus componentes presentan líneas de tendencia muy similares. Lo anterior refleja una lógica biológica en la distribución de los datos, ya que la mayor proporción de la biomasa del árbol se concentra en la madera del fuste y esta ejerce una influencia más grande en el modelo, tanto en la variabilidad como en la normalidad de los datos. Específicamente, la tendencia que se define para follaje es similar a la consignada para *Abies religiosa*; aunque en este caso, el modelo definido es polinómico (Flores-Nieves *et al.*, 2011).

En cuanto a la relación de biomasa de fuste con el diámetro normal, la tendencia es similar a la presentada por Flores-Nieves *et al.* (2011), incluso se ajusta a un modelo exponencial. Sin embargo, es importante considerar que, en algunos casos, la correlación de biomasa se define mejor con la altura del árbol (Chou y Gutiérrez-Espeleta, 2013).

Estimación de la concentración de carbono

De acuerdo al análisis de los cinco árboles muestreados, cuya concentración de carbono por componente se presenta en el Cuadro 4, el factor de conversión de biomasa a carbono (FC) fue el siguiente: para el fuste $FC_{ft}=0.4688$, ramas $FC_{rm}=0.4791$, follaje $FC_{fj}=0.4335$ y para el árbol $FC_a=0.4686$. Estos valores son ligeramente menores a los registrados para otras especies como *Pinus hartwegii* (Carrillo *et al.*, 2016). No obstante, coincide con la concentración de carbono de bosques de pino y de acahuales de 7 años (Figueroa-Navarro *et al.*, 2005).

Cuadro 4. Concentración de carbono (%) de las muestras analizadas.

Árbol	Trozas	Bolos	Leñas	Follaje
3	45.22	48.83	48.29	-
7	45.96	43.39	48.67	41.46
9	49.18	48.93	48.59	44.24
12	46.58	46.65	47.08	42.30
15	47.34	-	46.93	45.40
Promedio	46.856	46.950	47.912	43.350
Desviación estándar	1.52	2.60	0.84	1.80

Con el propósito de calcular con mayor precisión la concentración de carbono del arbolado, se utilizó el factor de conversión específico para la biomasa por componente, y con la suma de estos valores se obtuvo la concentración de carbono de cada árbol muestreado. La distribución promedio de carbono fue de 71.33 % para fuste, de 22.49 % para ramas y de 6.18 % para follaje. Al ajustar el mismo modelo utilizado para biomasa aérea, la ecuación para estimar la concentración de carbono de *C. odorata* quedó expresada como:

$$CC = 0.001562 \cdot DN^{3.389696} \quad (2)$$

Donde:

CC = Concentración de carbono (kg)

DN = Diámetro normal (cm)

El análisis de la ecuación generó los siguientes indicadores estadísticos: coeficiente de determinación ajustado, $R^2_a=0.9783$; coeficiente de variación, $CV=391.503$; y raíz del cuadrado medio del error, $RCME=3.7115$. En la Figura 4 se muestra el diagrama de dispersión y la relación entre las variables DN y concentración CC de los árboles.

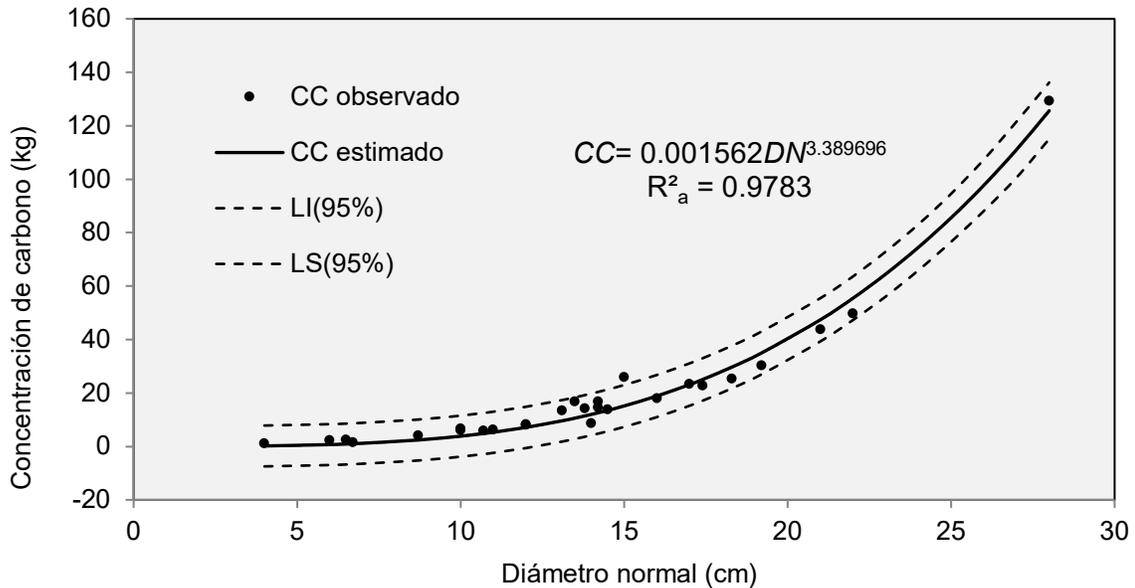


Figura 4. Diagrama de dispersión y relación entre diámetro normal y concentración de carbono en árboles de *Cedrela odorata* L.

Conclusiones

La concentración de carbono, respecto a la biomasa aérea en árboles de *Cedrela odorata* es de 46.86 % del carbono total almacenado; 71.33 % se distribuye en el fuste, 22.49 % en las ramas y 6.18 % en el follaje.

Al ajustar el modelo potencial $Y=b \cdot X^k$ a los datos de biomasa y carbono de *C. odorata*, las ecuaciones generadas para estimar la biomasa aérea y la concentración de carbono con base en el diámetro normal presentan un ajuste muy bueno, con coeficientes de determinación (R^2_a) superiores a 0.978.

A partir del valor de los estimadores estadísticos, así como del correspondiente a las pruebas de normalidad, independencia y heterocedasticidad se afirma que las ecuaciones determinadas son adecuadas y confiables para usarse en individuos de *C. odorata* en condiciones similares de crecimiento.

Los resultados de este estudio pueden aplicarse en la estimación de biomasa y carbono potencial de plantaciones forestales que se pretendan establecer en superficies específicas a diferentes escalas.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existen intereses de competencia.

Contribución por autor

Juan de Dios Benavides Solorio: coordinación del proyecto, análisis de datos, gráficos y escritura del artículo; Octavio Torres García: toma de datos en campo, gráficos y tablas y escritura del manuscrito; José Germán Flores Garnica: análisis de datos y corrección del artículo; Miguel Acosta Mireles: toma de datos de campo, apoyo en metodología y corrección de artículo; Agustín Rueda Sánchez: toma de datos en campo, trabajo de muestras en laboratorio y revisión del escrito.

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://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236610> (18 de noviembre de 2019).

Álvarez G., J. G., M. A. Balboa M., A. Merino G. y R. Rodríguez S. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Recursos Rurais 1(1):21-30 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3178817> (28 de enero de 2020).

Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. Fitotecnia Mexicana 32(3):233-238.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011 (19 de marzo de 2020)

Carrillo A., F., M. Acosta M., C. R. Jiménez C., L. González M. y J. D. Etchevers B. 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. Doi:10.29312/remexca.v7i3.327.

Chou, S. W. y E. E. Gutiérrez-Espeleta. 2013. Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. Tecnología en Marcha 26(2):41-54. Doi: 10.18845/tm.v26i2.1402.

Cutini, A., F. Chianucci and M. C. Manetti 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. I Forest (6):331-337. Doi:10.3832/ifor0941-006.

Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. 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.

Díaz-Ríos, M. de J., A. Vázquez-Alarcón, M. Uribe-Gómez, A. Sánchez V., A. Lara B. y A. Cruz L. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 16: 3235-3249. Doi:10.29312/remexca.v0i16.393.

Flores-Nieves, P., M. A. López-López, G. Ángeles-Pérez, M. de L. de la Isla-Serrano y G. Calva-Vasquéz. 2011. Modelos para la estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schldtl. *et Cham.* en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(8): 9-20. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.543>

Figuroa-Navarro, C., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez y M. Acosta-Mireles. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *TERRA Latinoamericana* 23(1): 57-64.

Figuroa-Navarro, C. M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez y H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Estimación de biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schldtl. *et Cham.* en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1):105-112. Doi: 10.29298/rmcf.v1i1.658.

Fonseca, W., J. M. Rey B. and F.E. Alice. 2011. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* (262):1400-1408. DOI:10.1016/j.foreco.2011.06.036.

Gayoso A., J., J. Guerra y D. Alarcón. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia (Chile): Universidad Austral de Chile, Proyecto medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Informe Final, Documento No. 1. 53 p. <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/113265> (11 de septiembre de 2019).

Gayoso A., J. y J. Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2):36-38. Doi: 10.4067/S0717-92002005000200005.

Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers-Barra, A. I. Monterrosos-Rivas, J. Campo-Alvez y J. A. Tinoco-Rueda. 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.

González B., O., P. Suatunce C. y L. Simba O. 2019. Carbono acumulado en la biomasa aérea en plantaciones de *Terminalia ivorensis* A. Chev (terminalia) y *Gmelina arborea* Roxb (melina), en el Litoral ecuatoriano. Ciencia y Tecnología UTEQ 12(1): 51-56. Doi:10.18779/cyt.v12i1.232.

Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI). 2016. Mapa Digital de México. Suelos. Esc. 1:250 000. 2002-2007.

<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jE4LjkwNDQ3LGxvbjotMTAzLjkyNTI2LHo6OCxsOmM0MTg=> (20 de enero de 2017).

Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. *In:* Pachauri, R. K. y A. Reisinger (eds.). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. Ginebra, Suiza. 104 p.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf (14 de enero de 2017).

Lim, H., K.-H. Lee, K. H. Lee and I. H. Park 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. Journal of Forest Research (18):316-322. Doi:10.1007/s10310-012-0353-2.

Návar, J., J. Nájera and E. Jurado 2001. Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of Northeastern Mexico. Journal of Arid Environments 52(2):167-179. Doi:10.1006/jare.2001.0819.

Návar C., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale and B. Parresol 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, México. Madera y Bosques 10(2):17-28. Doi:10.21829/myb.2004.1021272.



- Návar, J. 2010. Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. *In*: Ndombo, M. and B. Momba (eds.). Biomass. InTech. Rijeka, Croatia. pp. 27-64.
https://www.researchgate.net/publication/267298407_2_Measurement_and_Assessment_Methods_of_Forest_Aboveground_Biomass_A_Literature_Review_and_the_Challenges_Ahead (12 de octubre de 2019).
- Ordóñez, J. A., H. J. B. de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7(2): 27-47.
- Rodríguez O., G., H. M. De los Santos P., V. A. González H., A. Aldrete, A. Gómez G. y A. M. Fierros G. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1):25-41.
Doi:10.21829/myb.2012.1811116.
- Rojas-García, F., B. H. J. De Jong, P. Martínez-Zurimendí and F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72: 835–864. Doi: 10.1007/s13595-015-0456-y.
- Rojo M., G. E., J. Jasso M., J. Vargas H., D. J. Palma L. y A. Velázquez M. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39(4):449-456. <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/jul-ago/art-9.pdf> (8 de noviembre de 2019).
- Rueda S., A., A. Gallegos R., A., D. González E., J. A. Ruiz C., J. de 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 C., J. A., H. E. Flores L., J. R. Regalado R. y G. Ramírez O. 2012. Estadísticas climáticas normales del estado de Jalisco. Libro Técnico Núm. 2. INIFAP CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jal., México. 350 p.

Ruiz P., R., M. del Río and G. Montero 2011. New Models for estimating the carbon sink capacity of the Spanish softwood species. *Forests Systems* 20(1):176-188. Doi:10.5424/fs/2011201-11643.

Ruiz-Aquino, F., J. I. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortíz, 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.

SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3. User's Guide. Cary, NC, USA. SAS Institute Inc. n/p.

Soriano L., M. A. 2014. Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Universidad Autónoma de Chapingo. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 95 p.

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



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.