



Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila

Estimation of the above-ground biomass of *Pinus cembroides* Zucc. and *Pinus halepensis* Mill. in Saltillo, Coahuila

Pablo Marroquín Morales^{1*}, Jorge Méndez González¹, Javier Jiménez Pérez², Oscar Alberto Aguirre Calderón² y José Israel Yerena Yamalle²

Abstract

The Allometric models to estimate biomass, carbon and carbon dioxide, are of great importance in forest modeling, for these it is possible to quantify the mitigation of greenhouse gas emissions. The objective of present study was to adjust an allometric models for biomass aboveground estimation in a plantation of *Pinus cembroides* and *P. halepensis*. The aboveground was estimated with the indirect method (Adelaide Method) with a sample of 50 trees by species. The study was made in two areas: *Cuauhtémoc* and *El Recreo*, of *Saltillo, Coahuila*. For each biomass component of leaves-branches, stem and total six models were adjusted, using independent variables of diameter and height, selecting the best model according to the adjusted determination coefficient ($_{adj}R^2$), standard error (Sy_x) and the significance of the regression parameters. The results indicated that the diameter adequately estimates the biomass by component of *P. cembroides* ($_{adj}R^2$ average of 0.86), for *P. halepensis* the biomass is estimated with diameter and height ($_{adj}R^2$ of 0.79 on average). The indirect method is a good estimator of aboveground biomass in both species, the best adjustments of models can be used to quantify carbon storage and carbon dioxide in the region.

Key words: Adjustment, aboveground biomass, components, Adelaide method, allometric models, regression parameters.

Resumen

Los modelos alométricos para estimar biomasa, carbono y dióxido de carbono son de gran importancia en la modelación forestal, mediante estos es posible cuantificar la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo del presente estudio fue ajustar modelos alométricos para estimar la biomasa aérea en una plantación de *Pinus cembroides* y *P. halepensis*. Se aplicó el método indirecto (método *Adelaide*) con una muestra de 50 árboles por especie. El estudio se realizó en dos áreas: *Cuauhtémoc* y *El Recreo*, de *Saltillo, Coahuila*. Para cada componente de biomasa de hojas-ramas, fuste y total se ajustaron seis modelos, se utilizaron variables independientes de diámetro normal y altura; se seleccionó el mejor modelo conforme al coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), el error estándar (Sy_x) y la significancia de los parámetros de regresión. Los resultados indicaron que el diámetro normal estima, adecuadamente, la biomasa por componente de *P. cembroides* (R^2_{adj} promedio de 0.86); para *P. halepensis*, la biomasa se calculó con el diámetro normal y la altura (R^2_{adj} de 0.79 en promedio). El método indirecto es un buen estimador de biomasa aérea en ambas especies, los mejores ajustes de modelos pueden usarse para cuantificar almacenes de carbono y dióxido de carbono en la región.

Palabras clave: Ajuste, biomasa aérea, componentes, método de *Adelaide*, modelos alométricos, parámetros de regresión.

Fecha de recepción/Reception date: 19 de enero de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 16 de abril de 2018

¹Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

²Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: marroquin_34@hotmail.com

Introducción

Actualmente, se reconoce la importancia de los bosques como un medio para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en particular el dióxido de carbono (CO₂), causante del cambio climático; para ello se conservan áreas naturales y se establecen plantaciones forestales que propician el almacenamiento de carbono por periodos prolongados (Návar *et al.*, 2001; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011).

La biomasa de un bosque es de gran importancia, ya que permite determinar los montos de carbono (C) que existen en un área de conservación, o la cantidad potencial que es factible de liberarse a la atmósfera mediante el proceso de combustión (Brown *et al.*, 1996). La biomasa forestal se define como el peso de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo y, normalmente, se cuantifica en toneladas por hectárea de peso seco (Schlegel *et al.*, 2000).

La estimación de la biomasa aérea, en cualquier componente de un árbol, requiere un análisis directo o indirecto. El primero consiste en cortar el árbol y pesar las muestras de cada componente, para luego determinar el peso seco (Díaz *et al.*, 2007). El método indirecto se puede realizar a través del volumen de fuste, por medio de la densidad básica se estima el peso seco y un factor de expansión para calcular el peso seco total (Schlegel, 2001; Segura y Andrade, 2008). *Adelaide* es un método indirecto que consiste en tomar una rama a la que se le denomina unidad de mano o de referencia, esta tiene que ser representativa en forma y densidad foliar de la especie de interés, con ella se calcula el número de ramas presentes en cada árbol muestreado (Foroughbakhch *et al.*, 1996).

Si se conoce la biomasa y la concentración de carbono (C) por compartimento, es factible estimar con mayor precisión el contenido total de carbono de una especie; aunque, la concentración de carbono en las plantas es aproximadamente 50 % de biomasa seca, dicho valor varía en función de la forma de crecimiento (Becerril *et al.*, 2014; Pompa y Yerena, 2014).

La biomasa de un bosque se determina por modelos alométricos para cada especie en particular (Brown, 1997), ya que el uso de los modelos desarrollados en diferentes regiones presenta limitaciones, debido a las condiciones que rigen el crecimiento de los árboles, como su genética, el clima y el suelo (Álvarez, 2008). Algunos estudios han demostrado que el diámetro normal es la variable independiente que predice eficientemente la biomasa total en *Pinus halepensis* Mill., *P. pseudostrobus* Lindl., y *P. devoniana* Lindl., con coeficientes de determinación mayores a 0.73 (Méndez-González *et al.*, 2011; López, 2012; Domingo *et al.*, 2016). Xiao y Ceulemans (2004) obtuvieron la biomasa total de *P. sylvestris* L., con variables de diámetro normal, altura y diámetro de copa, con un R^2_{adj} de 0.98. Dado que cada especie y región debe tener un modelo para estimar la biomasa, se realizó el presente estudio cuyo objetivo fue ajustar modelos alométricos para calcular la biomasa aérea de *P. cembroides* y *P. halepensis*.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en plantaciones de 22 años de edad, ubicadas en dos ejidos en Saltillo, Coahuila. El primero, denominado Cuauhtémoc, se localiza en las coordenadas 25°16'45.60" N y 100°59'20.49" O, a una altitud de 2 162 m; y el segundo, nombrado El Recreo, con coordenadas de 25°14'43.94" N y 101°04'26.47" O, a una altitud de 1 982 m. En la zona existen bosque de pino, matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo; el clima corresponde al árido semicálido (BS_0hw) y semiárido templado (BS_1kw); con lluvias de verano, precipitación media anual de 125 a 400 mm, y una temperatura media anual de 14 a 18 °C; suelos Litosol y Xerosol cálcico (García, 1998).

Método indirecto para obtener biomasa

Se utilizó el método de *Adelaide* (Foroughbakhch *et al.*, 1996). Se seleccionó un árbol promedio de la plantación, en función de su diámetro y altura, se dividió en tres secciones y se aplicó el método (*Adelaide*) para cada una de ellas. Se cortó una rama representativa por única vez. Después, con la rama representativa de cada sección, se cuantificó cuantas veces cabía en su respectiva sección del árbol. Se muestrearon 50 individuos por especie, los cuales estaban sanos y eran representativos de las categorías de diámetro normal y de altura. En cada individuo se midió el diámetro normal (cm), diámetro menor y mayor de cada sección (cm) con una cinta diamétrica modelo 283D/5m *Forestry Suppliers* y las alturas (m) se midieron con cinta métrica (*Truper FH-5ME*).

La rama representativa, se llevó al laboratorio y colocó en una estufa de secado *Blue M.* a temperatura de 105 °C, hasta obtener su peso constante (Schlegel *et al.*, 2000); después del secado, se obtuvo el peso seco con la báscula *PZC-5 Pizza Controller Torrey*, cuya capacidad es de 5 kg y 1 g de precisión. Una vez obtenido el valor del peso seco de cada rama representativa, se multiplicó por la estimación del número de ramas de la sección correspondiente; las tres secciones se sumaron para determinar el peso seco de hojas-ramas por árbol. El peso seco del fuste se obtuvo al multiplicar el volumen por la densidad básica. El volumen de fuste se estimó con la fórmula (1) de *Smalian* y el área basal (g) mediante la fórmula 2.

$$V = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) * L \quad (1)$$

$$g = \frac{\pi}{4} * D^2 \quad (2)$$

Donde:

g = Área basal (m^2)

g_1 = Área basal menor de la sección (m^2)

g_2 = Área basal mayor de la sección (m^2)

L = Longitud de la troza de la sección (m)

D = Diámetro en (m)

La densidad básica en *P. cembroides* es de 450 kg m^{-3} (Ordoñez *et al.*, 2015) y 494 kg m^{-3} en *P. halepensis* (Ruano *et al.*, 2012). El peso seco total del árbol se calculó al sumar el peso seco de hojas-ramas y el peso seco de fuste (kg).

Ajuste y selección del modelo alométrico

La estimación de biomasa por componente (hojas-ramas, fuste y total) se realizó mediante modelos logarítmicos de regresión (Cuadro 1), los cuales se ajustaron con el método de Cuadrados Mínimos en el paquete estadístico *R Project* (R Core Team, 2017). La transformación logarítmica es de gran utilidad, ya que corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente, con respecto a los datos de la variable dependiente (Brown *et al.*, 1989). Es necesario hacer la transformación, porque la varianza es altamente inestable en unidades aritméticas y la transformación logarítmica rectifica el problema (Baskerville, 1972). Se evaluaron seis modelos con los estadísticos: coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), error estándar (Syx) y la significancia de los parámetros de regresión ($P < 0.05$).

Cuadro 1. Modelos para la estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc., y *Pinus halepensis* Mill.

Nombre	Función matemática
Logaritmo natural	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \varepsilon$
Variable combinada	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn^2 H) + \varepsilon$
Polinomial de grado 2	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(Dn)^2 + \varepsilon$
Polinomial de grado 3	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(Dn)^2 + \beta_3 \ln(Dn)^3 + \varepsilon$
Polinomial de grado 4	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(Dn)^2 + \beta_3 \ln(Dn)^3 + \beta_4 \ln(Dn)^4 + \varepsilon$
Variable generalizada	$\ln B = \beta_0 + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon$

\ln = Logaritmo natural; B = Biomasa (kg); β_0, \dots, β_4 = Parámetros de regresión; Dn = Diámetro normal (cm); H = Altura total (m).

Resultados y Discusión

Los árboles de *P. halepensis* presentaron mayores diámetros normales y alturas en comparación a *P. cembroides*; y se registraron diferencias en biomasa de hojas-ramas (Bhr), biomasa de fuste (Bf) y biomasa total (Bt) de 21.8, 38.0 y 59.8 kg, respectivamente con *P. cembroides* (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características dasométricas de los árboles muestreados de *Pinus cembroides* Zucc., y *Pinus halepensis* Mill.

Especie	n	Dn		H		Bhr		Bf		Bt	
		Mín.	Máx	Mín.	Máx	Mín.	Máx	Mín.	Máx	Mín.	Máx
<i>P. cembroides</i>	50	6.1	11.0	2.9	4.4	7.3	16.0	3.4	14.6	10.8	30.6
<i>P. halepensis</i>	50	6.9	22.8	3.1	6.7	7.8	37.8	7.9	52.6	16.7	90.4

n = Número de árboles muestreados; Dn = Diámetro normal (cm); H = Altura (m); Bhr = Biomasa de hojas-ramas (kg); Bf = Biomasa de fuste (kg); Bt = Biomasa total (kg); Mín = Mínimos; Máx = Máximos.

Parámetros de los modelos ajustados

Únicamente los modelos 4 y 6 no mostraron significancia ($P > 0.05$) en los parámetros de estimación en Bhr y Bt; para Bf los parámetros tampoco fueron significativos en los modelos 3, 5 y 6. Con la misma variable independiente de diámetro normal, pero con diferentes modelos en biomasa total Díaz *et al.* (2007) y Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012) indican parámetros más pequeños a los de este estudio (*P. cembroides*) de $\beta_0 = 0.035$ y 0.001 y $\beta_1 = 2.691$ y 1.980 respectivamente en *P. patula* Schiede ex Schlttdl. & Cham. (Cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros estimados de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc.

Nº	β_0	EE	β_1	EE	β_2	EE	β_3	EE	β_4	EE
Bhr										
1	-1.055	0.24	1.560	0.11	.	.	.	.	.	.
2	-0.916	0.24	0.571	0.04	.	.	.	.	.	.
3	14.005	1.81	-12.775	1.72	3.398	0.40	.	.	.	.
4	46.381*	23.25	-59.239*	33.32	25.539*	15.86	-3.504*	2.50	.	.
5	-1140.09	263.05	2215.13	503.63	1604.52	360.65	514.22	114.49	61.490	13.59
6	-1.058	0.26	1.571	0.31	-0.015*	0.42	.	.	.	.
Bf										
1	-1.685	0.30	1.799	0.14	.	.	.	.	.	.
2	-1.566	0.28	0.666	0.05	.	.	.	.	.	.
3	-8.103	3.38	7.908	3.21	-1.448*	0.76	.	.	.	.
4	-95.506	42.35	133.347	60.68	-61.223	28.89	9.459	4.57	.	.
5	-153.955*	577.76	245.389*	1106.17	-141.524*	792.12	34.964*	251.45	-3.029*	29.85
6	-1.555	0.31	1.297	0.38	0.712*	0.50	.	.	.	.
Bt										
1	-0.613	0.15	1.653	0.07	.	.	.	.	.	.
2	-0.484	0.14	0.608	0.02	.	.	.	.	.	.
3	5.078	1.59	-3.764	1.51	1.284	0.35	.	.	.	.
4	-9.265*	20.72	16.821*	29.68	-8.525*	14.13	1.552*	2.23	.	.
5	-655.440	265.67	1255.48	508.64	-896.290	364.23	283.510	115.63	-33.490	13.73
6	-0.558	0.16	1.439	0.19	0.303*	0.26	.	.	.	.

Nº = Número de modelo; β_0, \dots, β_4 = Parámetros estimados; EE = Error estándar de los parámetros.; * = Parámetros no significativos.

En *Pinus halepensis*, los modelos 1 y 2 arrojaron parámetros con diferencias significativas ($P < 0.05$) en comparación con el resto de los modelos en Bhr y Bt; en cuanto a Bf, los parámetros de los modelos 1, 2 y 6 presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$); lo contrario se obtuvo para los modelos 3, 4 y 5. El modelo 2 presentó cierta similitud en los parámetros de (β_1) 0.444 en Bhr, (β_1) 0.633 en Bf y (β_1) 0.540 en Bt (Cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus halepensis* Mill.

Nº	β_0	EE	β_1	EE	β_2	EE	β_3	EE	β_4	EE
Bhr										
1	0.223	0.31	1.067	0.12	.	.	.	.	.	.
2	-0.061	0.34	0.444	0.05	.	.	.	.	.	.
3	2.598*	2.23	-0.867*	1.80	0.389*	0.36	.	.	.	.
4	15.745*	17.31	-16.878*	20.98	6.821*	8.40	-0.852*	1.11	.	.
5	154.474*	138.17	-243.361*	224.78	144.351*	136.16	-37.669*	36.39	3.666*	3.62
6	-0.013*	0.36	0.938	0.16	0.338*	0.26	.	.	.	.
Bf										
1	-0.759	0.30	1.508	0.12	.	.	.	.	.	.
2	-1.198	0.30	0.633	0.04	.	.	.	.	.	.
3	0.076*	2.16	0.828*	1.75	0.137*	0.35	.	.	.	.
4	-18.522*	16.64	23.478*	20.17	-8.962*	8.08	1.206*	1.07	.	.
5	-197.831*	131.62	316.210*	214.12	-186.721*	129.70	48.792*	34.67	-4.739*	3.45
6	-1.193	0.33	1.272	0.14	0.622	0.23	.	.	.	.
Bt										
1	0.425	0.25	1.292	0.10	.	.	.	.	.	.
2	0.064	0.26	0.540	0.04	.	.	.	.	.	.
3	2.154*	1.80	-0.116*	1.45	0.283*	0.29	.	.	.	.
4	1.070*	14.03	1.205*	17.00	-0.247*	6.81	0.070*	0.90	.	.
5	-8.289*	113.22	16.484*	184.20	-9.525*	111.57	2.554*	29.82	-0.247*	2.96
6	0.094*	0.28	1.112	0.12	0.473	0.20	.	.	.	.

Nº = Número de modelo; β_0, \dots, β_4 = Parámetros estimados; EE = Error estándar de los parámetros; * = Parámetros no significativos.

Méndez-González *et al.* (2011) usaron las mismas variables independientes ($Dn^2 \times H$) para predecir la Bt, sus parámetros fueron diferentes de $\beta_0 = 4.660$, $\beta_1 = 0.006$ en hojas-ramas, $\beta_0 = 6.183$, $\beta_1 = 0.009$ en fuste, y $\beta_0 = 10.843$, $\beta_1 = 0.014$, en biomasa total para *P. devoniana*. En la misma especie del presente estudio (*P. halepensis*), López (2012) señala semejanza de los valores negativos en las ordenadas al origen y valores positivos en las pendientes de Bhr y Bf; sin embargo, para Bt fue opuesto, ya que la ordenada al origen y la pendiente fueron positivas en este estudio (*P. halepensis*).

Biomasa por componente en *Pinus cembroides* y *P. halepensis*

De los seis modelos probados, en *P. cembroides* se seleccionó el 3, ya que presentó los mejores estadísticos en Bhr y Bt, con un coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) por arriba de 0.90; en cambio para Bf fue el modelo 4 (R^2_{adj} de 0.75) con una R^2_{adj} promedio de 0.86 (en Bhr, Bf y Bt). Sin embargo, para *P. halepensis* se eligió el modelo 2 en Bhr, Bf y Bt, con una R^2_{adj} promedio de 0.79 (Cuadro 5).

A partir del mismo modelo (3) Álvarez (2008) estimó una R^2_{adj} menor de 0.93, así como el error de 0.67 kg en Bt para *Centrolobium tomentosum* Guill. ex Benth. Otros estudios han citado la misma R^2_{adj} de 0.94 en Bt, así como un menor error de 0.33 kg (Schlegel, 2001; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011). Con base en el diámetro normal como variable independiente Xiao y Ceulemans (2004) registraron un mejor ajuste y un mayor error en *P. sylvestris* (R^2_{adj} de 0.97, con un error de 2.61 kg), en comparación con *P. cembroides* de este estudio. Méndez- González *et al.* (2011) documentan una R^2 promedio de 0.87 en *P. pseudostrobus*, semejante a la del presente estudio (*P. cembroides*).

En la misma especie (*P. halepensis*) Domingo *et al.* (2016) y López (2012) indican mejores ajustes con una R^2 mayor de 0.77, 0.94 y 0.89 en Bhr, Bf y Bt, y con errores superiores a 12.59 kg. Caso contrario, Nívar (2011) señala un menor ajuste de 0.60 y 0.81 en Bhr y Bt, para Bf fue mayor (R^2 de 0.87), y con errores superiores a 9.4 kg, con respecto a *P. halepensis* de este estudio. Sin embargo, Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012) señalan un error menor de 5.0 kg y un ajuste mayor de 0.87 en Bt de *P. patula*. Montero *et al.* (2005) registraron una R^2_{adj} en promedio de 0.85, que representa un ajuste superior al que presentó *P. halepensis*, con un error < 0.92 kg.

Cuadro 5. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. / *Pinus halepensis* Mill.

Nº	R²ajustada	Syx	CV	P > F
Bhr				
1	0.81 / 0.65	1.07 / 4.07	10.58 / 22.24	2.20E-16 / 6.80E-01
2	0.80 / 0.67	1.10 / 3.99	10.86 / 21.81	2.20E-16 / 3.14E-11
3	0.90 / 0.65	0.80 / 4.09	7.88 / 22.35	2.20E-16 / 4.11E-10
4	0.91 / 0.65	0.74 / 4.12	7.33 / 22.50	2.20E-16 / 2.11E-09
5	0.86 / 0.63	0.93 / 4.19	9.21 / 22.91	2.20E-16 / 6.93E-09
6	0.81 / 0.66	1.08 / 4.03	10.69 / 22.00	2.20E-16 / 3.15E-10
Bf				
1	0.74 / 0.81	1.10 / 4.56	12.23 / 21.66	2.20E-16 / 2.2E-16
2	0.75 / 0.85	1.09 / 4.04	12.12 / 19.17	2.20E-16 / 2.2E-16
3	0.74 / 0.81	1.12 / 4.57	12.39 / 21.67	2.20E-16 / 2.73E-15
4	0.75 / 0.79	1.08 / 4.82	11.94 / 22.88	2.20E-16 / 1.45E-14
5	0.75 / 0.81	1.09 / 4.58	12.05 / 21.72	1.79E-15 / 4.52E-14
6	0.74 / 0.85	1.11 / 4.09	12.25 / 19.39	3.21E-16 / 2.2E-16
Bt				
1	0.92 / 0.82	1.23 / 7.14	6.44 / 18.13	2.20E-16 / 2.20E-16
2	0.92 / 0.85	1.25 / 6.50	6.56 / 16.50	2.20E-16 / 2.20E-16
3	0.94 / 0.82	1.07 / 7.09	5.62 / 18.01	2.20E-16 / 8.48E-16
4	0.93 / 0.81	1.10 / 7.18	5.75 / 18.23	2.20E-16 / 8.60E-15
5	0.50 / 0.81	3.03 / 7.23	15.86 / 18.35	2.20E-16 / 6.78E-14
6	0.92 / 0.84	1.24 / 6.59	6.47 / 16.72	2.20E-16 / 2.20E-16

Nº = Número de modelo; Syx = Error estándar (kg); CV = Coeficiente de variación (%); P > F = Significancia del modelo.

En las figuras 1A – 1F se muestran las curvas de ajuste. Entre componentes Bf se presentó una dispersión más grande en las estimadas, respecto a las observadas, debido a su coeficiente de variación (CV) de 11.94 % en *P. cembroides*. Mientras que para *P. halepensis* fue en el componente de Bhr, con un CV de 21.81 %. Además, ambas especies tuvieron una menor dispersión en los valores de Bt.

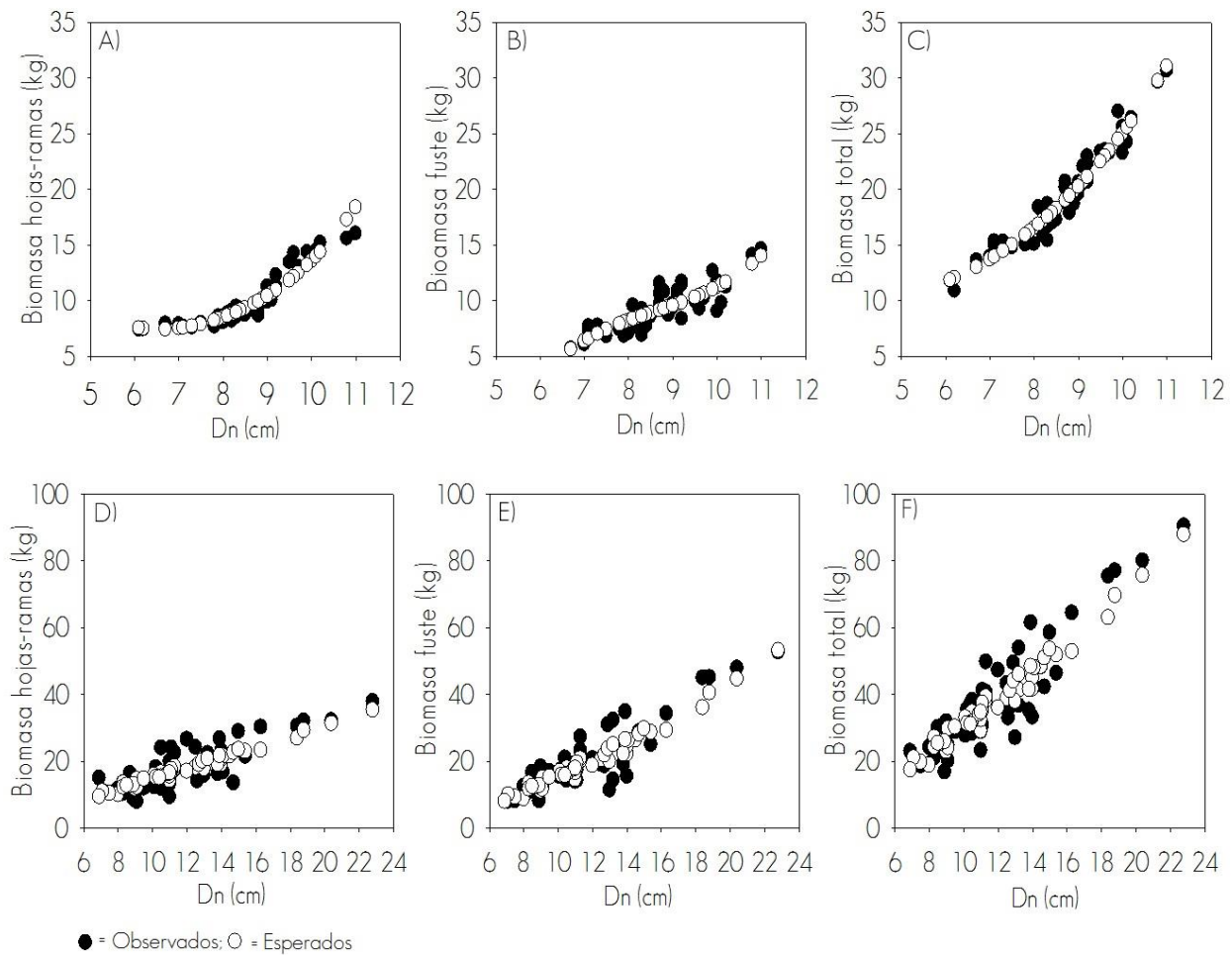
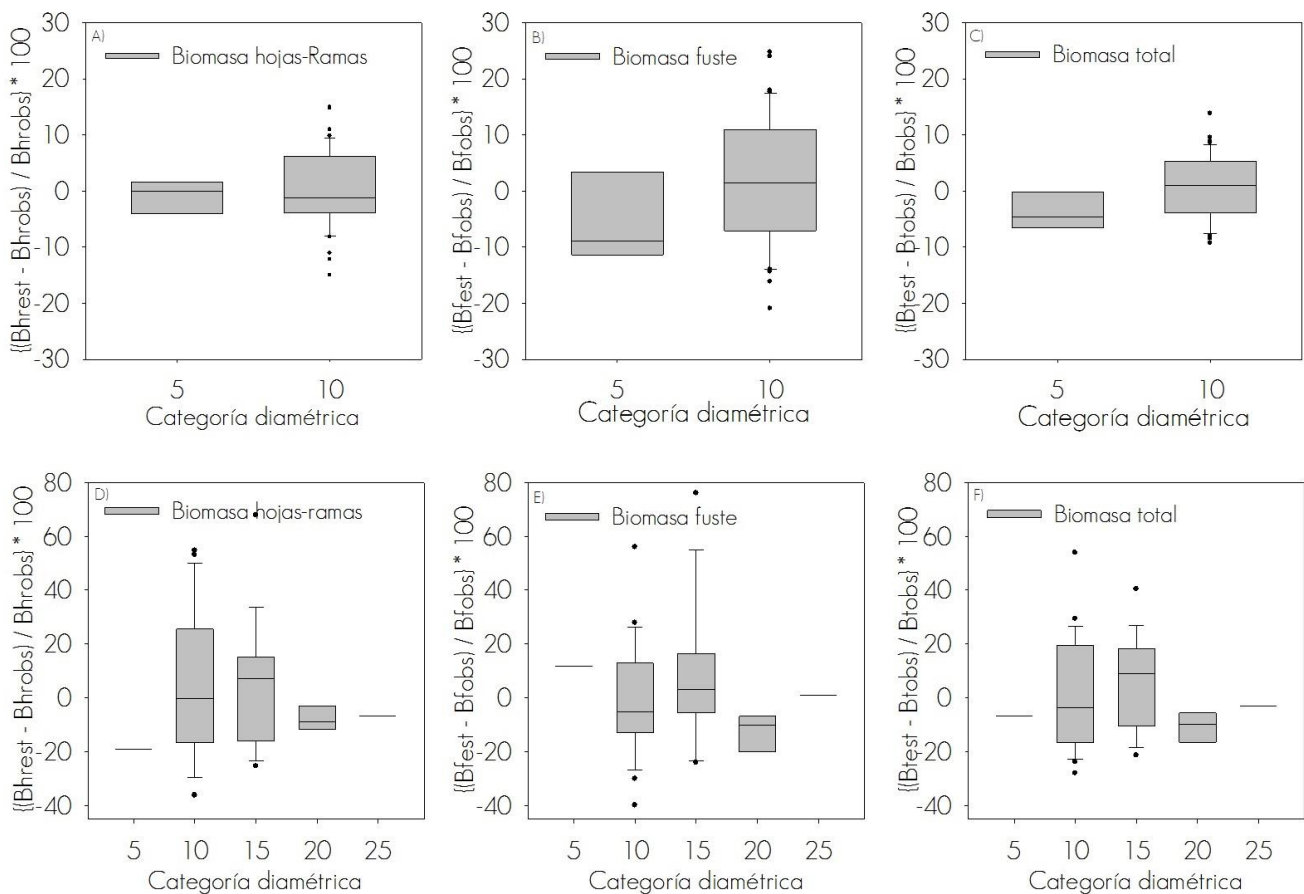


Figura 1. Biomasa observada y estimada de hojas-ramas, fuste y total en árboles provenientes de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc. (A – C) y *Pinus halepensis* Mill (D – F).

El modelo 3 registró un error mayor en la categoría de 10 cm en Bhr (Figura 2A); caso contrario para Bt (Figura 2C) en la categoría de 5 cm; y en Bf (Figura 2B) al modelo 4 le correspondió el error más alto en la categoría de 5 cm. Aunque para *P. halepensis*, el modelo 2 registró un menor error en la categoría 15 del componente fuste (Figura 2E) en comparación con el resto de las categorías. En Bhr (Figura 2D) y Bt (Figura 2F) el modelo tuvo menores errores en las categorías de 10 cm.



P. cembroides: Bhr y Bt = Biomasa estimada con el modelo 3; Bf = Biomasa estimada con el modelo 4; *P. halepensis*: Bhr, Bf y Bt = Biomasa estimada con el modelo 2.

Figura 2. Error porcentual de estimación en biomasa por componente en cada categoría diamétrica de *Pinus cembroides* Zucc. (A - C) y *P. halepensis* Mill (D - F).

Conclusiones

El método indirecto (*Adelaide*) es un buen estimador de biomasa aérea, cuyos mejores ajustes de los modelos se presentaron en biomasa total. En *Pinus cembroides* el diámetro normal predice adecuadamente la biomasa, en cambio para *P. halepensis* es necesario tener dos variables independientes: diámetro normal y altura. A partir de los modelos (variable combinada, polinomial de 2 y 3 grado) ajustados es factible derivar, de manera sencilla, datos de biomasa en hojas-ramas, fuste y total del árbol, así como en rodales, para posteriormente estimar el carbono y dióxido de carbono almacenado. Los modelos con errores porcentuales en las categorías diamétricas subestiman la biomasa.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por el apoyo que brindó para la realización del estudio.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Pablo Marroquín Morales: planeación y desarrollo de la investigación, levantamiento, procesamiento y captura de datos, análisis estadísticos, redacción y estructura del documento; Jorge Méndez González: análisis estadísticos y revisión de la estructura del documento; Javier Jiménez Pérez: revisión del manuscrito y estructura; Oscar Alberto Aguirre Calderón: estructura y revisión del documento; José Israel Yerena Yamallel: revisión del manuscrito.

Referencias

Aguirre-Calderón, O. A. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación de contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 74-84.

Álvarez, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 89 p.

Baskerville, G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 2 (1): 49-53.

Becerril, P. R., E. González S. y N. M. Ramos S. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1 (1): 9-18.

Brown, S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4): 881-902.

Brown, S., J. Sathaye, M. Cannell and P. Kauppi. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere management by forest. *Commonwealth Forestry Review* 75: 80-91.

Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical. A. primer. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Paper 134. Rome, Italy. 134 p.

Díaz, F. R., M. Acosta, M., F. Carrillo, A., E. Buendía, R., E. Flores, A., y J. D. Etchevers. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13:25-34.

Domingo, R. D., M. T. Lamelas, G., A. L. Montealegre, G., y J. de la Riva, F. 2016. Estimación de la pérdida de biomasa y de las emisiones de CO₂ generadas por la combustión de masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en el incendio de Luna (Aragón), mediante datos LiDAR-PNOA. *In: XVII Congreso Nacional de Tecnología Información Geográfica*. 29 de junio a 1 de julio. Málaga, España. pp. 83-88.

Foroughbakhch, R., G. Reyes, D., L. Hauad. A. and M. Badii H. 1996. Three Methods of Determining Leaf Biomass on Ten Woody Shrub Species in Northeastern Mexico. *Agrociencia* 30: 3-24.

García, E. 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México. Escala 1:1000000. n/p.

López O., L. A. 2012. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea en una plantación de *Pinus halepensis* Mill. En Saltillo, Coahuila. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México. 34 p.

Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrete, M. Á. Capó-Arteaga y J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl., y *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4): 479-491.

Montero, G., R. Ruiz. P. y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 264 p.

Návar, J., N. González., y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. *In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de octubre. Valdivia, Chile. pp. 1-12.

- Návar, J. 2011. Componentes de la biomasa en el matorral espinoso tamaulipeco y los bosques templados secos de pino del noreste de México. *Polibotánica* 31:21-141.
- Ordoñez D., J. A. B., A. Galicia N., N. J. Venegas M., T. Hernández T., M. de J. Ordoñez D. y R. Dávalos-Sotelo. 2015. Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*. 21: 77-216.
- Pompa, G. M. y J. I. Yerena, G. 2014. Concentración de carbono en *Pinus cembroides* Zucc. Fuente potencial de mitigación del calentamiento global. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17 (1): 133-143.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/> (28 de febrero de 2017).
- Rodríguez-Ortiz, G., H. M. De los Santos-Posadas, V. A. Gonzáles-Hernández, A. Aldrete., A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18 (1): 25-41.
- Ruano B., I., E, Rodríguez-García y F. Bravo O. 2012. Respuesta de la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis* Mill. a los tratamientos selvícolas en el sureste de España. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 34:213-219.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. *In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de octubre. Valdivia, Chile. pp. 1-13.
- Schlegel, B., J. Gayoso., y J. Guerra. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en los bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 20 p.

Segura, M. y H. Andrade. 2008. ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería de las Américas* 46: 89-96.

Xiao, C. W. and R. Ceulemans. 2004. Allometric relationships for below and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management* 203(1-3): 177-186.



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.