

Cuantificación de biomasa y carbono en la reforestación de *Pinus halepensis* Mill., campus universitario de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Biomass and carbon quantification in a reforested area of *Pinus halepensis* Mill., in the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro campus

Jorge Méndez-González^{1*}, Luis Alejandro López-Ochoa¹, Eladio Cornejo-Oviedo¹, Alejandro Zermeño-González¹ y Juan Abel Nájera-Luna²

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, 25315, Saltillo, Coah., México. jmendezg@hotmail.com [*Autor responsable]. ²División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de El Salto (ITES). Mesa del Tecnológico s/n, El Salto, 34942, Pueblo Nuevo, Durango, México.

RESUMEN

La estimación adecuada de biomasa aérea de árboles juega un papel importante en el manejo de ecosistemas forestales. El objetivo del presente estudio fue cuantificar biomasa aérea de una plantación [270 ± 15 árboles ha^{-1}] de *Pinus halepensis* Mill., con la ecuación alométrica de la forma: 1) $\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) \cdot FC$ y 2) $y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$, donde β_0 y β_1 son parámetros de regresión, "y" es biomasa (kg), "x" es diámetro normal (cm) y FC es un factor de corrección ponderado. Los resultados demuestran que la cuantificación de biomasa de *Pinus halepensis* Mill., contrasta cuando se utilizan diferentes métodos de estimación de parámetros: ecuación 1 (Ec. 1) y ecuación 2 (Ec. 2). La Ec. 1 sobrestima la biomasa de *Pinus halepensis* hasta en más de 7%; no obstante, los mejores ajustes ($R^2 > 0.97$) se obtuvieron al utilizar la Ec. 2, con la que se calculó un almacén de $58.3 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$. De acuerdo al modelo de Schumacher, el fuste de *Pinus halepensis* contribuye con 3.1 y 1.5 veces más biomasa que hojas y ramas. El máximo incremento de biomasa total se obtendría a los 53 años de edad, lo que representa 2.8, 1.6 y 5.9 ton ha^{-1} de biomasa, carbono y dióxido de carbono, respectivamente.

Palabras clave: biomasa, carbono, crecimiento-incremento, pino alepo, México.

ABSTRACT

The adequate estimation of aboveground biomass of trees plays an important role in the management of forest systems. The objective of the present study was to quantify the aboveground biomass in a plantation [270 ± 15 trees ha^{-1}] of *Pinus halepensis* Mill., using the allometric equation of the form: 1) $\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) \cdot FC$, and 2) $y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$, where β_0 and β_1 are regression parameters, "y" is biomass (kg), "x" is normal diameter (cm) and FC is a weighted correction factor. Results show that the quantification of biomass of *Pinus halepensis* Mill., contrasts when different parameter estimation methods are used (equation 1 and equation 2). Equation 1 overestimates the biomass of *Pinus halepensis* by as much as 7%; however, the best fits ($R^2 > 0.97$) are obtained with equation 2. A store of $58.3 + \text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ is calculated. According to the Schumacher model, the stem of *Pinus halepensis* contributes 3.1 and 1.5 times more biomass than leaves and branches. The maximum increment in total biomass would be obtained at 53 years of age, representing 2.8, 1.6 and 5.9-ton ha^{-1} of biomass, carbon and carbon dioxide.

Key words: biomass, carbon, growth-increment, aleppo pine, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una amenaza para el medio ambiente, los recursos naturales, la economía, la seguridad alimentaria e, incluso, para la salud humana; a éste se le atribuye la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera por arriba de los niveles históricos, los cuales han aumentado de 280 a 379 ppm en los últimos 150 años (IPCC, 2007), aproximadamente 1.5 ppm año⁻¹, lo que ha afectado los patrones globales de precipitación y temperatura.

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI más abundantes, ya que constituye el 72% del total de ellos y causa hasta el 26% del forzamiento radiactivo del sistema climático (Kiehl y Trenberth, 1997). En el proceso de fotosíntesis de las plantas, el CO₂ que se fija en moléculas de carbono constituye, aproximadamente, el 50% de su biomasa seca (Gayoso y Schlegel, 2001); su tasa de fijación es proporcional a la tasa de crecimiento de cada especie (Méndez *et al.*, 2011), y por ende, al potencial que tiene la especie de mitigar los efectos del cambio climático (Brown, 1997; Gayoso y Schlegel, 2001). A las modificaciones producidas en cualquier variable dendrométrica del árbol se les denomina crecimiento, y cuando éste se evalúa en el tiempo, se le conoce como incremento (Zeide, 1993), y es el volumen (o biomasa por derivación de él) el mejor parámetro para expresar el crecimiento de un rodal.

La biomasa vegetal se define como la cantidad total de materia orgánica existente por arriba y por abajo del suelo, expresada como peso anhidro por unidad de área (Brown 1997; FAO, 2004). De esta manera, es importante cuantificar la biomasa en estudios de captura de carbono (Gayoso y Schlegel, 2001), por considerarse un parámetro que caracteriza la productividad de los ecosistemas (Brown, 1997), además de ser base para crear escenarios futuros ante el cambio climático, pues permite conocer el efecto atenuador de los bosques, al secuestrar GEI (Maser *et al.*, 1997).

Los bosques del mundo cubren más de 4 mil millones de ha, es decir, el 31% de la superficie total de la tierra, de las que 264 millones son plantaciones, lo que equivale a sólo el 7% del total (FAO, 2010). Las 31 millones de ha de los bosques de México representan un almacén aproximado de 8 Gt C (Maser *et al.*, 1997); no obstante, este tipo de estudios es escaso en plantaciones forestales, a pesar de ser estratégicas para almacenar carbono de una forma más rápida y eficiente

(Méndez *et al.*, 2011). *Pinus halepensis* Mill. es una especie mediterránea, heliófila, termófila y xerófila adaptada a la sequía, y adaptable a gran rango altitudinal (Herranz, 2000); se ha usado exitosamente para la recuperación de suelos *post* incendio (Montero *et al.*, 2001; Mitsopoulos y Dimitrakopoulos, 2007), y en el área de estudio su introducción data de poco más de cinco décadas; también forma parte de parques urbanos, así como de grandes áreas en plantaciones forestales. El presente estudio tuvo como objetivos: 1) generar ecuaciones alométricas para cuantificar la biomasa aérea, el carbono, los incrementos anuales, y lo que éstos representan en una plantación de *Pinus halepensis* Mill. en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México, y 2) evaluar la predicción de biomasa con el uso de diferentes procedimientos de estimación de parámetros del modelo alométrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La plantación de *Pinus halepensis* en el área de estudio, que abarca aproximadamente 1000 ha, se estableció en ocho etapas diferentes, entre 1960 y 1977; se localiza dentro de los límites del área natural protegida: Sierra de Zapalinamé, a 7 km al sur de Sotillo, Coahuila, México. El clima es semicálido (BWh (e)), con temperatura media anual de 18 °C y precipitación de 300 mm anuales (Conabio, 1998); suelo xerosol cálcico, con una textura media de 80% de caliche (Semarnat, 1998).

Método destructivo para obtener biomasa en verde

El trabajo de campo se realizó en noviembre de 2010. Se seleccionaron 20 árboles a los que, previo a su derribo, se les midió el diámetro a 1.30 m, y la altura total. Zianis y Mencuccini (2004) y Zianis *et al.* (2005), evidencian que cerca del 30% de estudios de biomasa utilizan entre 11 y 20 árboles, por lo que se optó por este tamaño de muestra. Para obtener el peso en verde del árbol, se utilizó el método destructivo (derribo, desrame y pesaje) (Gutiérrez y Lopera, 2001; Schlegel *et al.*, 2000; Ritson y Sochacki, 2003), que incluyó árboles de todas las categorías de diámetro y altura (Návar *et al.*, 2001). Para evitar pérdida de biomasa (hojas y ramillas) se colocaron sobre el suelo lonas de plástico. Después, el árbol se separó en componentes: hojas, ramas y fuste. Cada componente se pesó en verde, con básculas de diferente capacidad: 150 kg/20 g y 20 kg/2 g; para obtener el contenido de

humedad, de cada componente se extrajo una muestra en fresco de acuerdo con Schlegel *et al.* (2000) y Díaz *et al.* (2007), mientras que, para tal propósito, del fuste se extrajeron rodajas de aproximadamente 5 cm de grosor, que se obtuvieron cada metro de longitud desde la base (0.10 m) hasta la punta del árbol (Méndez *et al.*, 2011).

Determinación de materia seca por componente

Ya en laboratorio, las muestras se secaron en una estufa Hildebrand, a temperatura de 80 °C por 8 días, o hasta alcanzar peso anhidro, para obtener de esta manera el contenido de humedad de cada componente (Schlegel *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2007). La biomasa seca de cada componente: hojas (*Bh*), ramas (*Br*), fuste (*Bf*), y la suma de ellos: biomasa total (*Bt*), se obtuvo utilizando la relación peso fresco/peso seco (Schlegel *et al.*, 2000; Méndez *et al.*, 2011) en función del contenido de humedad calculado previamente.

Ajuste de la ecuación alométrica

La biomasa de cada componente de *Pinus halepensis* se calculó con la ecuación alométrica en su forma logarítmica: $\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) \pm \varepsilon_i$ [1] (Zianis y Mencuccini, 2004), y en su forma exponencial: $y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1} \pm \varepsilon_i$ [2], donde β_0 y β_1 son parámetros de regresión, “ y_i ” es biomasa del componente (kg), “ x_i ” es diámetro normal (cm) y ε_i es el error. Los coeficientes de regresión β_0 y β_1 se obtuvieron por cuadrados mínimos, con el uso del programa estadístico SAS v. 9.0, con ‘proc reg’ en Ec. 1 y ‘proc nlin’ en Ec. 2; en esta última se usaron derivadas y el método iterativo modificado Gauss Newton, el cual produce estimaciones de cuadrados mínimos ponderados. La Ec.1 se multiplicó por el factor de corrección ponderado: $FC = \exp^{(CME/2)}$ (Sprugel, 1983).

Obtención de contenido de carbono en *Pinus halepensis*

El contenido de carbono (%) de cada componente de *Pinus halepensis* se obtuvo usando el método de calcinación, que consiste en incinerar a 600 °C 1 gr de muestra durante cuatro horas; de la ceniza se obtuvo el porcentaje mineralizado y materia orgánica, ésta última multiplicada por un coeficiente estandarizado (1.72) para obtener el porcentaje de carbono (López y López, 1967; Ritson y Sochacki, 2003). El carbono almacenado en la biomasa del árbol se obtuvo por el producto de la biomasa del componente, por contenido de carbono del mismo componente (Gayoso y Schlegel, 2001; Gutiérrez y Lopera, 2001).

El dióxido de carbono (CO₂) se calculó mediante la proporción del peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de carbono (12) (Gayoso *et al.*, 2002). La extrapolación de C y CO₂ a unidad de superficie se estimó en función de los parámetros del árbol medio, como lo indica Lieth (1975).

Estimación de incremento en biomasa, carbono y dióxido de carbono

La edad de cada árbol de *Pinus halepensis* se obtuvo mediante el conteo de anillos de crecimiento de la rodaja obtenida a 0.10 m de altura, a la cual se le sumaron dos años (número de años que tardó en alcanzar esta altura). Con el modelo de Schumacher: $y_i = \exp^{(\beta_0 + \beta_1 E)} \pm \varepsilon_i$ [3], donde y_i = biomasa de hojas, ramas, fuste y total (kg), β_0 y β_1 = parámetros de regresión, exp = base de los logaritmos neperianos, E = edad (años) y $\pm \varepsilon_i$ error, se cuantificó el crecimiento en biomasa de cada componente de *Pinus halepensis*. El incremento medio anual (IMA) de cada componente se obtuvo de la siguiente manera: $\partial Y / \partial \beta_1 = (-1 / E) \cdot \exp(\beta_0 + \beta_1 / E)$ [4], mientras que el incremento corriente anual (ICA) se determinó por: $\partial Y / \partial E^2 = -\beta_1 / E^2 \exp(\beta_0 + \beta_1 / E)$ [5], de acuerdo con lo expuesto por Méndez *et al.* (2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Generalidades

De acuerdo con los resultados del inventario realizado en la plantación de *Pinus halepensis*, se encontraron árboles desde 22 hasta 51 años de edad, con un diámetro de entre 5 y 22 cm, y una altura de 4 a 10 m, con un promedio de 28 años, 16 cm y 7 m, y una densidad de 270 ± 15 árboles ha⁻¹. Montero *et al.* (2001), en un estudio en varias provincias de España, reportaron altura similar en *Pinus halepensis* desde 6 hasta 10 m a esta misma edad, e indicaron que su incremento máximo en altura se dio a los 80 años. De acuerdo con los árboles analizados, se obtuvo una biomasa promedio de 7.9, 17.5, 27.3 y 52.8 kg árbol⁻¹ en hojas, ramas, fuste y total, respectivamente. En este estudio, la biomasa total máxima (190 kg) está representada por un árbol de 31 años de edad, 22 cm de diámetro y 9.7 m de altura, lo que demuestra variaciones dimensionales y de biomasa en árboles de *Pinus halepensis*, especialmente con la edad. No obstante, en árboles de *Pinus halepensis* con estas mismas características, plantados en Israel, Grünzweig *et al.* (2007) reportaron 187 kg, por lo que resulta

muy similar la producción de biomasa en diferente localización geográfica.

Ecuaciones para estimar biomasa en *Pinus halepensis*

De acuerdo con Ec. 1, los mejores ajustes se registraron en biomasa de fuste y total, con $R^2 > 0.94$ (Cuadro 1), mientras que los ajustes más bajos se observaron en hojas y ramas (R^2 de 0.56 y 0.77), lo que demuestra un incremento en el error de estimación (Cuadro 1). El componente hojas presentó gran variación en biomasa (54.42% de C.V.), contrario a lo que se observa en fuste (22.15%). No obstante, todas las ecuaciones presentaron alta significancia estadística ($Pr < 0.0001$) (Cuadro 1). En esta misma especie, con la Ec. 2, Grünzweig *et al.* (2007) encontraron mejores ajustes R^2 de 0.98, 0.97 y 0.99 en biomasa de hojas, ramas y fuste, mientras que Mitsopoulos y Dimitrakopoulos (2007), reportaron R^2 de 0.82 a 0.88 para estimar biomasa de copa de *Pinus halepensis*. De forma similar, Xiao y Ceulemans (2004), al cuantificar biomasa, encontraron R^2 de 0.99 en hojas y 0.98 en ramas y fuste de *Pinus sylvestris* (sinonimia de *P. halepensis*).

En plantaciones forestales, al utilizar Méndez *et al.* (2011) la Ec. 1, reportaron ajustes de 0.57, 0.85 y 0.85 en *P. devoniana*, y de 0.84, 0.92 y 0.90 en hojas,

ramas y fuste de *P. pseudostrobus*; Nívar *et al.* (2001) reportaron $R^2 < 0.66$ en biomasa de hojas en *P. cooperi* y *P. duranguensis*; Zianis *et al.* (2005), en biomasa total de *Pinus pinaster* registraron R^2 de hasta 0.99; Díaz *et al.* (2007) reportaron R^2 de 0.98 en biomasa total de *Pinus patula*; Xiadong *et al.* (2010) en *P. koraiensis* muestran ajustes de 0.95, 0.96 y 0.98 en hojas, ramas y fuste. La mayoría de los estudios, al utilizar diámetro normal, demuestran una estimación adecuada de biomasa aérea, especialmente para fuste, no así para hojas y ramas.

La biomasa de árboles de *P. halepensis* se encuentra fraccionada en 14 ± 4.6 , 32 ± 11.2 y $54 \pm 9.9\%$ en hojas, ramas y fuste, valores que no incrementan ni decrecientan con la edad (eje x superior, Figura 1), ni con el diámetro (eje x inferior, Figura 1), según ajuste a una línea recta ($P > 0.05$), contrario a lo que se reporta en otras especies (Nívar *et al.*, 2001; Méndez *et al.*, 2011). La tendencia de distribución de biomasa aérea en esta especie, con respecto a diámetro o edad es relevante, puesto que mantiene constante el factor de expansión de volumen comercial a biomasa (1.94 ± 0.30), al menos en la edad (19 a 38 años) y diámetros (5 a 22 cm) incluidos en esta investigación. Los valores porcentuales de biomasa de *P. halepensis* en este estudio fueron semejantes a otras especies, por ejemplo, Méndez *et al.* (2011) reportaron en *Pinus devoniana*

Cuadro 1. Estadísticos de ajuste de la ecuación alométrica a la biomasa de hojas, ramas, fuste y total, de árboles individuales de *Pinus halepensis* en la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México.

Componete	β_0	β_1	C.V.	Sxy	R^2	Pr<F	FC	S
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i)$ (Ecuación 1)								
Hojas	-4.5885	2.6599	54.42	4.35	0.56	<.0001	1.12	-0.22
Ramas	-2.9100	2.2967	38.18	6.71	0.77	<.0001	1.16	0.95
Fuste	-1.7323	2.0360	22.15	6.05	0.94	<.0001	1.02	0.21
Total	-1.3048	2.1231	23.83	12.59	0.94	<.0001	1.03	0.62
$y_i = \beta_0 + x_i^{\beta_1}$ (Ecuación 2)								
Hojas	0.0380	2.1607	26.31	2.10	0.96	<.0001		-0.09
Ramas	0.0902	2.1265	31.67	5.56	0.95	<.0001		0.04
Fuste	0.2695	1.8821	20.85	5.69	0.97	<.0001		-0.31
Total	0.3789	2.0032	22.75	12.02	0.97	<.0001		-0.40

β_0 y β_1 = Parámetros de regresión de la ecuación alométrica, C.V. = Coeficiente de variación (%), Sxy = Error estándar (kg), R^2 = Coeficiente de determinación, Pr < F = Significancia del modelo, FC = Factor de corrección a la ecuación 1, S = Sesgo promedio (kg), y_i = Biomasa de hojas, ramas, fuste y total (kg), \ln = logaritmo natural, x_i = Diámetro normal (cm).

39.8% en hojas-ramas y 60.1% en fuste; en *Pinus pseudostrobus* 41.6% en hojas-ramas y 58.3% en fuste. Pacheco *et al.* (2007), en árboles jóvenes de *Pinus greggii* reportaron 24.0, 25.0 y 51.0% en hojas, ramas y fuste. Nívar *et al.* (2001), en plantaciones de *P. durangensis* registraron 13.5, 22.5 y 64.0% en hojas, ramas y fuste; en *P. cooperi* fue de 10.6, 22.4 y 67.0%, respectivamente. Xiao y Ceulemans, (2004) en estos mismos componentes reportaron 22, 25 y 40% en *P. sylvestris*.

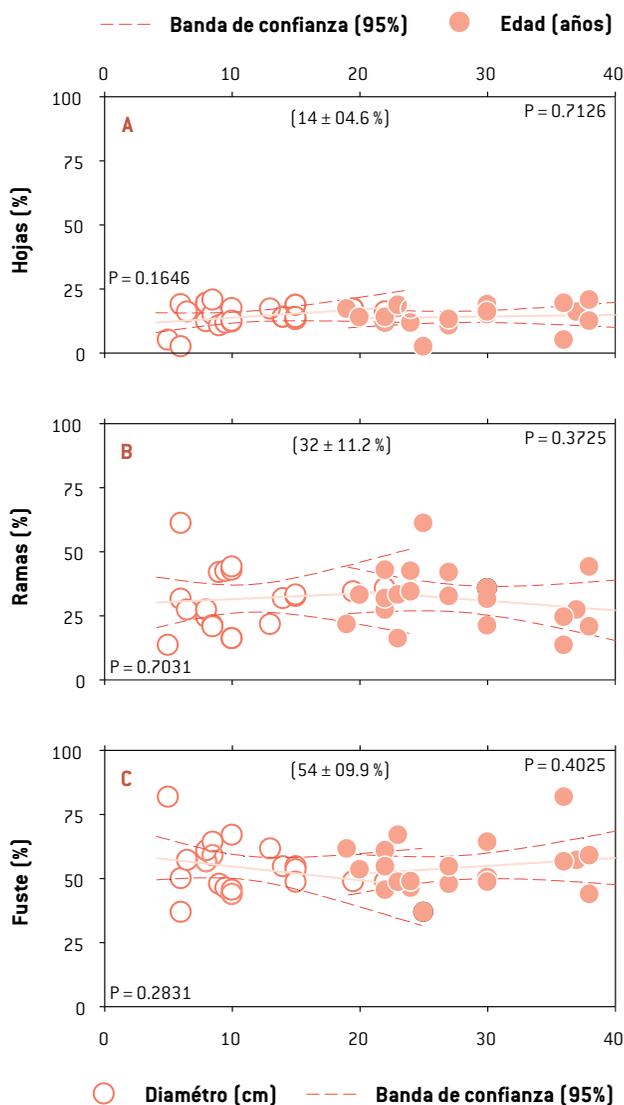


Figura 1. Distribución y tendencia lineal de biomasa porcentual en relación a diámetro normal (eje x inferior) y edad (eje x superior), en hojas [A], ramas [B] y fuste [C], en una plantación de *Pinus halepensis* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

Acumulación de carbono y CO₂ por componente

La concentración de carbono en esta especie, según la metodología propuesta por López y López (1967) y aplicada por Ritson y Sochacki (2003), es de $56 \pm 0.57\%$ en hojas, $57 \pm 0.57\%$ en ramas y $57 \pm 0.51\%$ en fuste, de $n = 12$; valores altos, pero contenidos dentro del rango (43 - 58%) que menciona el IPCC (1996). Otros estudios revelan valores porcentuales de carbono más bajos, por citar algunos: Gutiérrez y Lopera (2001), en *P. patula* obtuvieron 51% en hojas ramas y fuste, e incluso hasta 56.1% en corteza; Ritson y Sochacki, (2003) reportaron en *P. pinaster* 53% en hojas y ramas, y 52% en fuste; Pacheco *et al.* (2007), al promediar el contenido de carbono en componentes de *P. greggii*, obtuvieron 51%; Díaz *et al.* (2007) registraron en hojas y ramas de *P. patula* 49%, y 52% en fuste; Li *et al.* (2011) en *Pinus koraiensis* reportaron 49, 50 y 48% en hojas, ramas y fuste. No obstante, según Zheng *et al.* (2008) se han encontrado concentraciones de carbono más altas, que registraron hasta 59% en hojas de *Pinus elliottii*, e incluso hasta 61% en fuste de *Pinus massoniana*.

La biomasa de *P. halepensis* obtenida con la Ec. 1, multiplicada por su FC fue de 5.45, 10.46, 13.93 y 27.90 t ha⁻¹ en hojas, ramas, fuste y total (Cuadro 2). Al hacer la operación de producto de biomasa por la concentración de carbono correspondiente, se calcularon 3.05, 5.96, 7.94 y 15.90 t C ha⁻¹ en hojas, ramas, fuste y total, valores que al transformarlos a CO₂ equivalen a 11.20, 21.88, 29.15 y 58.36 t CO₂ ha⁻¹ (Cuadro 2). En plantaciones forestales de entre 6 y 29 años de edad, Gutiérrez y Lopera (2001), al evaluar *P. patula* documentaron desde 48 hasta 287 t C ha⁻¹, lo que representa más de 1000 t CO₂ ha⁻¹. En árboles de seis años de *P. greggii*, Pacheco *et al.* (2007) encontraron 65.80 t CO₂ ha⁻¹, mientras que Méndez *et al.* (2011) registraron 72.02 t CO₂ ha⁻¹ en una plantación mixta de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* de 12 años de edad. Estos valores están relacionados con el ritmo de crecimiento de la especie, la edad, el número de árboles por hectárea, la productividad del sitio, entre otros, como lo sugiere Zeide (1993).

Biomasa estimada con proc reg y proc nlin

Los resultados obtenidos demuestran que usar las ecuaciones 1 y 2 para cuantificar biomasa aérea de *Pinus halepensis*, representa diferencias significativas. El factor de corrección FC obtenido en *Pinus halepensis*, propuesto por Sprugel (1983), fue de 1.12, 1.16, 1.02 y 1.03 en Bh, Br, Bf y Bt (Cuadro 1), que

Cuadro 2. Almacenes de biomasa, carbono y dióxido de carbono, en una plantación de *Pinus halepensis* en la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México.

Ecuación utilizada / No.	Biomasa (t ha ⁻¹)			
	Hojas	Ramas	Fuste	Total
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i)$ (1)	4.85	9.00	13.73	27.72
$y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$ (2)	4.21	9.05	13.34	26.59
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) * FC$	5.45	10.46	13.93	27.90
Carbono (t C ha⁻¹)				
Obtenida a partir de 1	2.72	5.13	7.82	15.43
Obtenida a partir de 2	2.36	5.16	7.60	15.16
Obtenida a partir de 1*FC	3.05	5.96	7.94	15.90
CO₂ (t CO₂ ha⁻¹)				
Obtenida a partir de 1	9.98	18.83	28.72	56.63
Obtenida a partir de 2	8.65	18.93	27.90	55.63
Obtenida a partir de 1*FC	11.20	21.88	29.15	58.36

y_i = Biomasa área por componente: hojas, ramas fuste y total (kg) de *Pinus halepensis*, x_i = Diámetro a 1.30 m (cm), FC = Factor de corrección, ln = logaritmo natural, β_0 y β_1 = Parámetros de regresión.

resultó muy similar al reportado por Li *et al.* (2011) en *Pinus koraiensis*, quienes indicaron que fue de 1.01, 1.02 y 1.01 en hojas, ramas y fuste. La ecuación 1 multiplicada por su FC (Cuadro 1) sobreestima + 15.3, + 9.8, + 0.8 y + 1.8% en hojas, ramas, fuste y total, con respecto a la biomasa observada (Cuadro 3), especialmente distinguible en categorías diamétricas superiores (diámetro > 15 cm) (Figura 2). En términos cuantitativos, estos valores porcentuales representan + 833.93, + 1030.04, + 106.55 y + 515.41 kg ha⁻¹ (Cuadro 3).

Con la Ec. 2, se obtuvo + 1.1, - 0.2, + 1.1 y + 0.8% en hojas, ramas, fuste y total, lo que representa + 48.13, - 8.91, +152.8 y + 201.24 kg ha⁻¹ con respecto a la biomasa observada (Cuadro 3), y demuestra que con la ecuación en forma $y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$ se obtienen los mejores ajustes de biomasa aérea de *Pinus halepensis*, puesto que el sesgo promedio (Cuadro 1) y los valores porcentuales, con respecto a la biomasa observada se aproximan a cero (Cuadro 3). La diferencia más importante al usar las ecuaciones 1 y 2 se obtiene cuando se cuantifica biomasa de ramas de *Pinus halepensis*, ya que se observa una diferencia de hasta 0.91 unidades del sesgo [Lineal (ecuación 1) – No lineal (ecuación 2)], contrario a lo que ocurre con biomasa de fuste, cuya diferencia es de solo

0.10 unidades (Cuadro 1). La estimación de biomasa de fuste de *Pinus halepensis* es muy similar con ambas ecuaciones, incluso al aplicar el FC (Figura 2). En la práctica, el uso de uno u otro modelo podría depender del mejor ajuste –independientemente de la forma de estimación de parámetros– del objeto de estudio, puesto que en términos cuantitativos se observa hasta más de 1 ton ha⁻¹ de diferencia entre uno y otro modelo (biomasa de ramas), lo que en términos económicos representa diferencias importantes, especialmente cuando se trata de venta de créditos de carbono (1 bono = t CO₂).

Para obtener el estadístico W, en este estudio se evaluó la normalidad de las variables que integraron las ecuaciones alométricas con la prueba de Shapiro-Wilk (95%), y se obtuvieron los siguientes resultados: W = 0.9076 y Pr = 0.0574 (diámetro normal); W = 0.7883 y Pr = 0.0006 (*Bh*); W = 0.8269 y Pr = 0.0022 (*Br*); W = 0.840 y Pr = 0.0037 (*Bf*); W = 0.8213 y Pr = 0.0018 (*Bt*), lo que indica en todos los casos una distribución normal de los datos.

Incremento en biomasa, carbono y dióxido de carbono en *Pinus halepensis*

El modelo de Schumacher explica adecuadamente el crecimiento de *Pinus halepensis* en biomasa acu-

Cuadro 3. Diferencias cualitativas (A) y cuantitativas (B) de biomasa aérea por componente de *Pinus halepensis*, en relación a la biomasa observada, estimada con diferentes procedimientos.

A) Diferencias cualitativas por componente (%)				
Ecuación utilizada / No	Hojas	Ramas	Fuste	Total
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i)$ (1)	+2.80	-5.50	-0.70	-1.20
$y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$ (2)	+1.10	-0.20	+1.10	+0.80
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) * FC$	+15.30	+9.80	+0.80	+1.80

B) Diferencias cuantitativas por componente (kg ha ⁻¹)				
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i)$ (1)	+134.44	-194.40	-39.85	-124.39
$y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$ (2)	+48.13	-18.91	+152.58	+201.24
$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i) * FC$	+833.93	+1030.04	+106.55	+515.41

y_i = Biomasa de hojas, ramas, fuste y total, x = Diámetro normal (cm), FC = Factor de corrección, \ln = logaritmo natural, β_0 y β_1 = Parámetros de regresión.

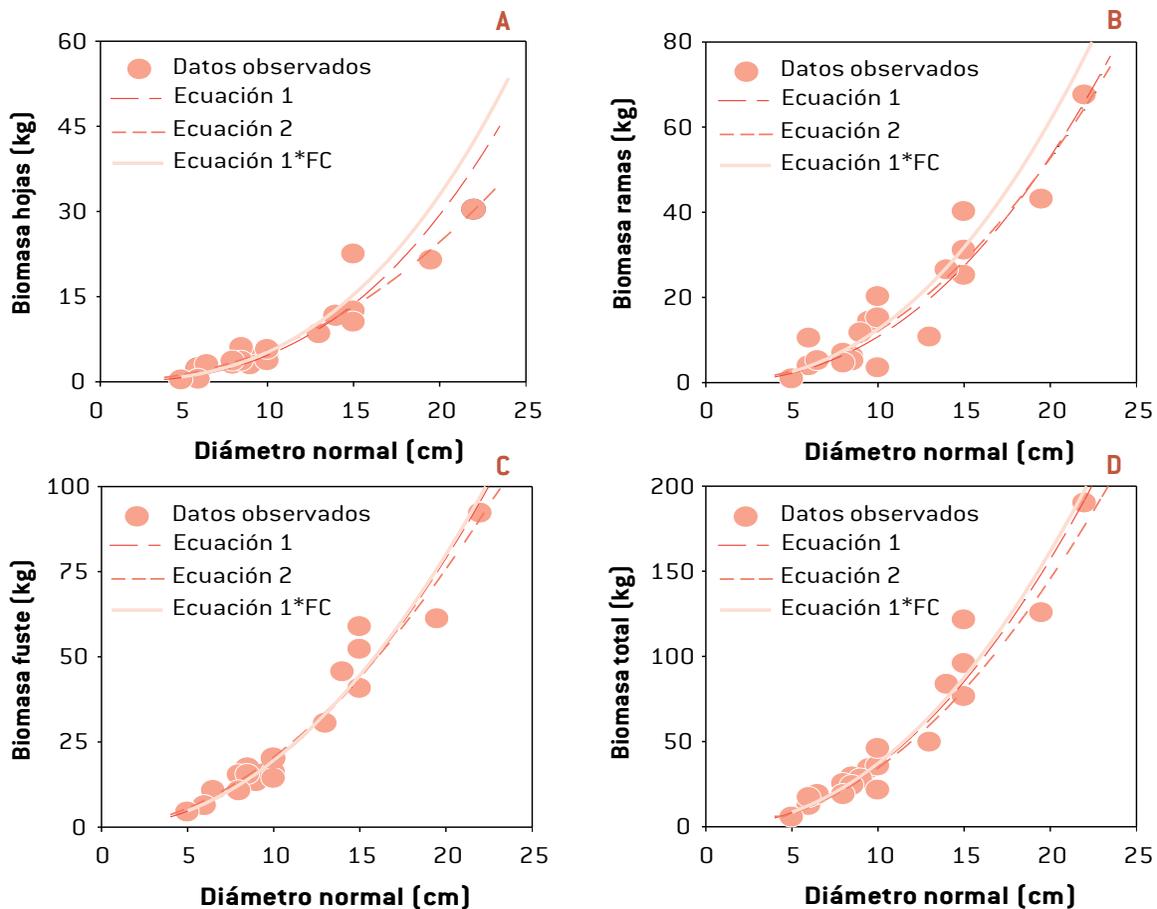


Figura 2. Biomasa de hojas (A), ramas (B), fuste (C) y total (D), estimada con ecuación la alométrica 1 y 2, en árboles individuales de *Pinus halepensis* en la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México

mulada de fuste y total con un 88% y 85% de la variación total, seguida de las hojas con un 84% y con sólo un 79% en las ramas (Cuadro 4). Pocos estudios han estimado incremento en biomasa con este mismo modelo. Méndez *et al.* (2011) lo hicieron, y después de cuantificar el crecimiento en biomasa de fuste de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*, reportaron ajustes de 0.95 y 0.82 de R². De acuerdo con la edad promedio de la plantación (28 años), se obtuvo un crecimiento en biomasa acumulada de 6.67, 15.32, 24.68 y 46.76 kg árbol⁻¹ en hojas, ramas, fuste y total (Figura 3). A esta misma edad, Méndez *et al.* (2011) reportaron en árboles dominantes de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* 134.0 y 204.36 kg en biomasa de fuste;

Díaz *et al.* (2007), en árboles de *P. patula*, indicaron que la biomasa de fuste fue de 113 kg; Nívar *et al.* (2001) encontraron desde 80.10 a 110.50 kg en algunas especies de *Pinus*. Con base a lo antes expuesto, los resultados demuestran que *Pinus halepensis* acumula gran cantidad de biomasa en ramas, sin embargo, la biomasa de fuste llega a ser desde 2 hasta 7 veces menor que en otras especies.

El ICA en biomasa de hojas, ramas, fuste y total, a la edad de 28 años, fue de 1.01, 2.07, 3.14 y 6.24 kg árbol⁻¹ (Figura 3; Cuadro 5). A partir de la densidad de plantación (270 árboles ha⁻¹) y los parámetros del árbol promedio, se calculó un incremento de 272.70, 558.90, 847.80 y 1684.80 kg de biomasa ha⁻¹ año⁻¹,

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste del modelo de Schumacher a la biomasa de hojas, ramas, fuste y total, de una plantación de *Pinus halepensis* en la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México.

Componete	n	β_0	β_1	C.V.	Sxy	R ²	Pr<F
Hojas	20	6.1769	-119.7808	55.44	4.43	0.84	<.0001
Ramas	20	6.5435	-106.8304	63.11	11.08	0.79	<.0001
Fuste	20	6.7954	-100.5029	45.60	12.45	0.88	<.0001
Total	20	7.6094	-105.4382	51.49	27.21	0.85	<.0001

n = Tamaño de muestra, β_0, β_1 = Parámetros de regresión, C.V. = Coeficiente de variación (%), Sxy = Error estándar (kg), R² = Coeficiente de determinación, Pr < F = Significancia del modelo.

Cuadro 5. Incrementos anuales en biomasa por componente de *Pinus halepensis*, a la edad de 28 años, en la Sierra Zapalinamé, Coahuila, México.

Componete	Biomasa (kg árbol ⁻¹)	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Carbono (kg ha ⁻¹)	CO ₂ (kg ha ⁻¹)	CO ₂ Total* (ton)
Incremento Corriente Anual					
Hojas	1.01	272.70	152.71	560.45	560.45
Ramas	2.07	558.90	318.57	1169.16	1169.16
Fuste	3.14	847.80	483.25	1773.51	1773.51
Total	6.24	1684.80	960.34	3524.43	3524.43
Incremento Medio Anual					
Hojas	0.24	64.80	36.94	135.56	135.56
Ramas	0.55	148.50	84.65	310.65	310.65
Fuste	0.88	237.60	135.43	497.04	497.04
Total	1.67	450.90	257.01	943.24	943.24

* Nota: Los cálculos están en función de la superficie de la plantación de *Pinus halepensis* (1000 ha).

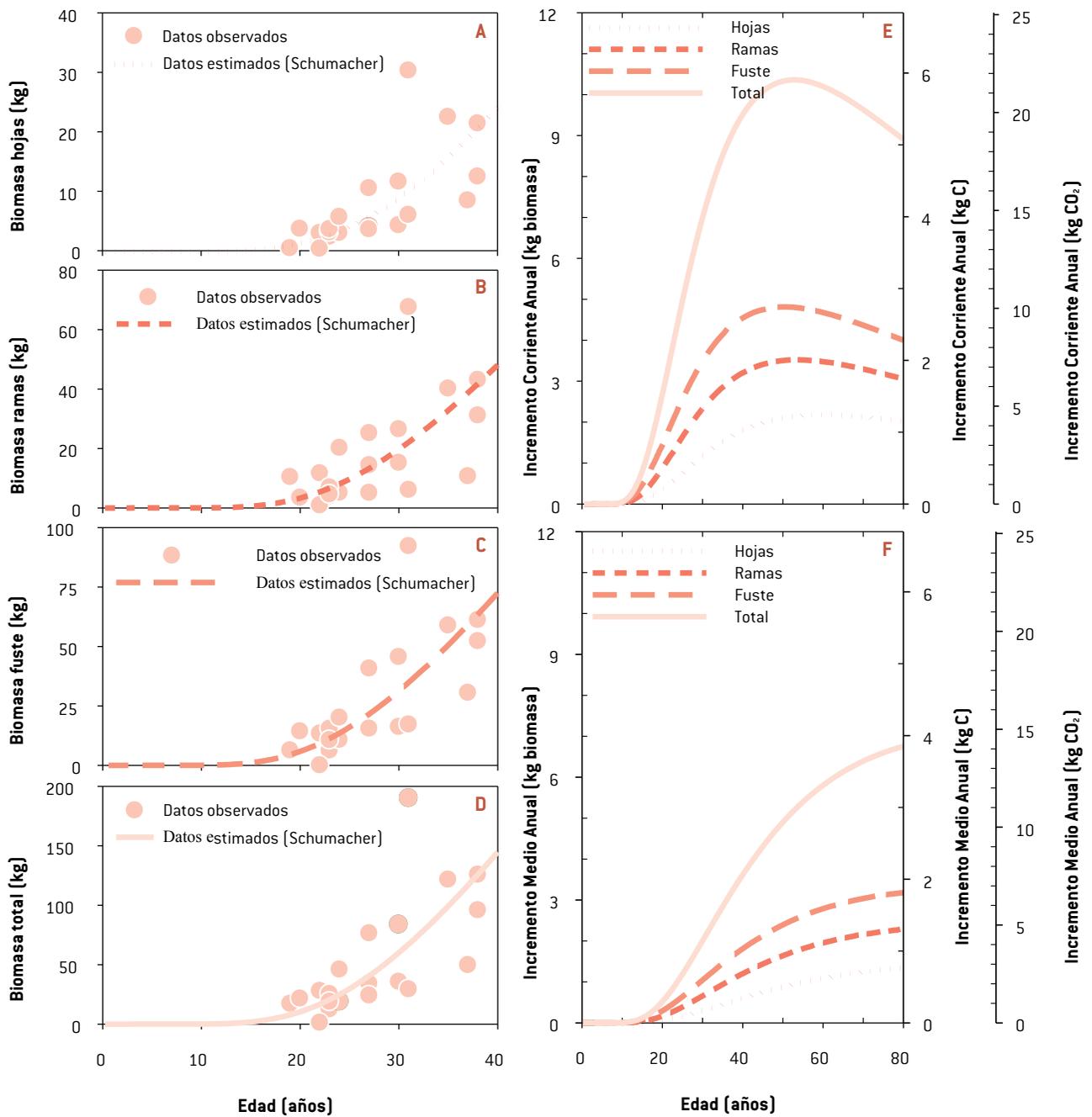


Figura 3. Cronología del crecimiento en biomasa de hojas (A), ramas (B), fuste (C) y total (D) (izquierda), e incremento corriente anual (E) y medio anual (F) en biomasa, carbono y dióxido de carbono por componente (derecha), en una plantación de *Pinus halepensis* en Sierra, Zapalina-mé, Coahuila, México.

equivalente a 560.45, 1169.16, 1773.51 y 3524.43 kg de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 5), en hojas, ramas, fuste y total. En este sentido, el máximo incremento (ICA) en biomasa total de *Pinus halepensis* se obtendría a los 53 años, lo que representaría 10.36 (2797.11), 5.91 (1594.35) y 21.67 (5851.27) kg árbol⁻¹ (kg ha⁻¹) de biomasa, carbono y CO₂, respectivamente.

En relación al IMA, se observó que el máximo incremento en biomasa podría ocurrir a los 100 años. Tanto los incrementos anuales, como la edad de máxima acumulación en biomasa de esta especie, difieren significativamente al compararse con otras. Por ejemplo, Méndez *et al.* (2011) reportaron a la edad de 10 años un ICA e IMA de 7.66 y 4.29; 11.30 y 5.27 kg árbol⁻¹ de biomasa de fuste en *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*, mientras que en *Pinus halepensis*, estos valores fueron únicamente de 0.042 y 0.004 kg de biomasa árbol⁻¹.

CONCLUSIONES

El diámetro normal predice adecuadamente la biomasa aérea de *Pinus halepensis*, aunque se sugiere que para mejores estimaciones se integren los componentes hojas, ramas y fuste en un solo modelo. La ecuación alométrica de la forma: $\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(x_i)$, por su factor de corrección ponderado (FC), sobrestima la biomasa de *Pinus halepensis* en 7% promedio, lo que representa en ramas más de 1 ton ha⁻¹; no obstante, el modelo de la forma $y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1}$ presenta los mejores ajustes. El máximo ICA en biomasa total de *Pinus halepensis* se obtendría aproximadamente a los 53 años, lo que representaría 2.8, 1.6 y 5.9 ton ha⁻¹ de biomasa, carbono y dióxido de carbono. El fuste de *Pinus halepensis* contribuye con 3.1 y 1.5 veces de más biomasa que las hojas y las ramas; las ramas con 2.0 veces más que las hojas. A nivel árbol, la acumulación de biomasa de *P. halepensis* es mayor que otras especies; no obstante, el incremento anual es de hasta diez veces menos que en *Pinus devoniana*, *P. pseudostrobus*, *P. greggii*, *P. cooperi* y *P. durangensis*.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por el apoyo para la realización de este trabajo, mediante el proyecto de investigación clave: 02-03-0207-2136. Se agradece la colaboración de alumnos

de la UAAAN de la materia de Epidometría, semestre enero-junio 2011, por apoyar con trabajos de campo.

LITERATURA CITADA

- BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. Roma, Italia. FAO. (Informe Montes No. 134). 55 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad). 1998. Diferentes tipos de climas de la república mexicana de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García. Escala 1: 1000000.
- DÍAZ, F.R., M.M. Acosta, A.F. Carrillo, R.E. Buendía, A.E. Flores, J.D. Etchevers. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham., Madera y bosques, 13(1): 25-34. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61713103.pdf>
- FAO. 2004. Global forest resources assessment update 2005, Terms and definitions (Final version), Rome. <http://www.fao.org/docrep/007/ae156e/ae156e00.HTM> (acceso: 04 de enero de 2012).
- FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales, Informe principal. Departamento Forestal. Viale delle Terme di Caralla. 00153. Roma, Italia. 346 p. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>.
- GAYOSO, A.J. y B. Schlegel. 2001. Proyectos forestales para mitigación de gases de efecto invernadero. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia de Chile: 41-49.
- GAYOSO, A.J., C.J. Guerra y D. Alarcón. 2002. Medición de la capacidad de la captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: inventario de biomasa y contabilidad de carbono FONDEF. Universidad Austral de Chile. INFOR. Valdivia, Chile. 127 p.
- GRÜNZWEIG, J.M., I. Gelfand, I. and D. Yakir. 2007. Biogeochemical factors contribution to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. Biogeosciences, 4: 981-904. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/76/48/PDF/bg-4-891-2007.pdf>.
- GUTIÉRREZ, V., V.H. y G.J. Lopera A. 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia Chile, 18 pp. http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/15_Gutierrez.PDF.
- HERRANZ S., J.M. 2000. Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 10:13-17. <http://www.secforestales.org/buscador/pdf/C10-Acta01.pdf>.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and work book of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Mexico city, September 11-13,1996.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC WG1 AR4 Final Report. 996 p.
- KIEHL, J.T. and K.E. Trenberth. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(2): 197-208. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/papers/KiehlTrenbBAMS97.pdf>.
- LI, X., M.J. Yi, Y. Son, P.S. Park, K.H. Lee, Y.M. Son, R.H. Kim, and M.J. Jeong. 2011. Biomass and carbon storage in an age sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forest in Central Korea. Journal of Plant Biology, 54: 33-42. <http://www.springerlink.com/content/mvl2516k153h36g5/fulltext.pdf>.
- LIETH, H. 1975. Primary production of the major vegetation units of the world. In: Primary Productivity of the Biosphere. H. Lieth, R.H. Whittaker (Eds.). Ecological Studies 14. Springer-Verlag, New York and Berlin. pp. 203-215.
- LÓPEZ, R.J. y M.J. López. 1967. El diagnóstico de suelos y plantas (método de campo laboratorio). Ed. Mundiprensa, Madrid, España. 363 p.
- MASERA, R.O., J.M. Ordoñez and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. Climate change, 35: 265-295.
- MÉNDEZ, G.J., S.L. Luckie N., M.A. Capó A. y J.A Nájera L. 2011. 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. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2011/may-jun/art-7.pdf>.
- MITSOPOULOS, I.D. and A.P. Dimitrakopoulos. 2007. Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. International Journal of Wildland Fire, 16(5): 642-647.
- MONTERO, G., I. Cañellas and P.R. Ruiz. 2001. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. Investigaciones Sistemas Recursos Forestales, 10(1): 180-201. http://www.inia.es/gcontrec/pub/monte_1049878826902.pdf.
- NÁVAR, J., N. González y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia Chile, 12 p. http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/31_Navar.PDF.
- PACHECO, E.F.C., A. Aldrete, G.A. Gómez, G.A.M. Fierros, A.V.M. Cetina y H.H. Vaquera. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana, 30: 251-254. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/610/61003006.pdf>.
- RITSON, P. and S. Sochacki. 2003. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* tree in farm forestry plantations, south western Australia. Forest Ecology and Management, 175:103- 117.
- SAS, 2000. Help and documentation, SAS 9.1.3, SAS Institute Inc., Cary, NC.
- SCHLEGEL, B, J. Gayoso y J. Guerra. 2000. Manual de procedimientos, muestreo de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. 24 p. http://200.85.14.153/components/com_biblioteca/Archivos/manmuesbio.pdf.
- SEMARNAT 1998. Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana. (Primera aproximación 1996). Escala 1:4000000. México.
- SPRUGEL, D.G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology, 64: 209-210.
- XIAO, C.W. and R. Ceulemans. 2004. Allometric relationships for below and aboveground biomass of young Scots pines. Forest ecology and management, 203: 177-186. ftp://ftp.bgc.mpg.de/pub/outgoing/athuille/Publications/2004/Xiao_FEaM_2004.pdf.
- ZEIDE, B. 1993. Analysis of growth equations. Forest Science, 39: 591-616.
- ZHENG, H., Z. Ouyang, W. Xu, X. Wang, H. Miao, X. Li and Y. Tian. 2008. Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China. Forest Ecology and Management, 255 (3-4): 1113-1121.
- ZIANIS, D. and M. Mencuccini. 2004. On simplifying allometric analyzes of forest biomass. Forest Ecology and Management, 187:311-332. <http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/forestsci/zianis2004a.pdf>.
- ZIANIS, D., P. Muukkonen, R. Mäkipää and M. Mencuccini. 2005. Biomass and stem volume equation for tree species in Europe. Silvia Fennica, Monographs, 4: 63 p. <http://www.metla.fi/silvafennica/full/smf/smf004.pdf>.