



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>

Artículo

Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México

Favian Flores Medina¹

Daniel José Vega-Nieva^{1*}

José Javier Corral-Rivas¹

Juan Gabriel Álvarez-González²

Ana Daria Ruiz-González²

Carlos Antonio López-Sánchez¹

Artemio Carillo Parra¹

¹Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

²Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela. España.

* Autor por correspondencia, correo-e: danieljvn@gmail.com

Resumen:

El objetivo del trabajo consistió en el desarrollo de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea por fracciones de grosor de la regeneración de *Arbutus arizonica*, *Juniperus deppeana*, *Quercus sideroxyla* y *Pinus cooperi* en la Unidad de Manejo Forestal (Umafor 1008) en el estado de Durango. Se utilizaron datos provenientes de 114 individuos (25, 29, 30 y 30, respectivamente), colectados mediante un muestreo destructivo para ajustar los modelos. La aditividad de las ecuaciones de estimación de biomasa se aseguró mediante el ajuste simultáneo de todas las ecuaciones, con el procedimiento estadístico denominado 3SLS (*Three-Stage Least Squares*). Los modelos desarrollados permiten estimar la biomasa en peso seco de los componentes, peso total, hojas, ramillas (< 0.5 cm), ramas finas (0.51 – 2.5 cm), ramas gruesas y tronco (> 2.51 cm). Las ecuaciones alométricas con mejor ajuste correspondieron al peso total, con valores de coeficiente de determinación ajustado de 0.97, 0.94, 0.95 y 0.97 para *Arbutus*, *Juniperus*, *Quercus* y *Pinus cooperi*, respectivamente. En general las ecuaciones mostraron un ajuste satisfactorio en cada una de las fracciones; con ellas se podrán hacer estimaciones no destructivas de la biomasa por categoría de grosor de la regeneración de las cuatro especies estudiadas, lo que mejorará las predicciones de biomasa y almacén de carbono por fracciones en los bosques con presencia de los cuatro taxa estudiados.

Palabras clave: Biomasa, carbono, modelos alométricos, fracción de grosor, regeneración.

Fecha de recepción/Reception date: 25 de octubre de 2017.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 19 de febrero de 2018.

Introducción

Los modelos alométricos son herramientas importantes para estimar, de una manera adecuada, la biomasa y el carbono de los bosques, además son empleados en los inventarios de combustibles para el cálculo de las cargas de distintas fracciones de arbolado tanto adulto como regenerado.

Los trabajos de alometría, generalmente, consideran las fracciones de biomasa de hojas, tronco y ramas según su grosor; las categorías de ramillas (<0.5 cm), ramas finas (generalmente de 0.5 a 2.5 cm), así como ramas medias y gruesas (>2.5 y 7.5 cm, respectivamente) son las más frecuentes (Reed y Toméb, 1998; Álvarez *et al.*, 2005; Antonio *et al.*, 2007; Muñoz *et al.*, 2008; Pérez-Cruzado *et al.*, 2011a, 2011b; González-García *et al.*, 2013; Jiménez *et al.*, 2013; Vega-Nieva *et al.*, 2015).

La alocaión de la biomasa en fracciones cambia en relación al diámetro normal (Fontes *et al.* 2006; Antonio *et al.* 2007; Vega-Nieva *et al.*, 2015), lo que hace necesario evaluarla en diferentes estadios del desarrollo de las masas arbóreas. Por ejemplo, en el trabajo de Antonio *et al.* (2007) se registraron diferencias en las alometrías desarrolladas para *Eucalyptus globulus* Labill., según el estado de desarrollo de la masa, y sus modelos específicos para árboles jóvenes con pequeñas dimensiones. En México, se ha observado que, en individuos con diámetros menores a 15 cm, la biomasa de las fracciones de hojas, ramillas y ramas representa hasta 55 %; en cambio con diámetros superiores a 20 cm, la concentración de la biomasa se encuentra en mayor proporción en el fuste (Soriano-Luna *at al.*, 2015; Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

El modelado de la cantidad de biomasa en cada una de estas fracciones a lo largo de diferentes edades es importante para los sistemas de contabilidad de carbono (Pérez-Cruzado *et al.*, 2011b; González-García *et al.*, 2013). Asimismo, es relevante conocer la biomasa presente en distintas fracciones, por los diferentes patrones de acumulación de nutrientes entre fracciones y edades, lo cual es importante para

evaluar la sostenibilidad nutricional del manejo de las masas forestales, a partir de las prácticas de manejo, tales como la extracción de fracciones más finas o las edades de rotación en el balance de nutrientes de las masas arbóreas (Brañas *et al.*, 2000; Dambrine *et al.*, 2000; Laclau *et al.*, 2000; Merino *et al.*, 2003, 2005).

En México, los modelos alométricos se han desarrollado para diferentes necesidades (Morfín-Ríos *et al.* 2012; Ruiz-Díaz *et al.* 2014), y la mayoría de los estudios disponibles en alometrías de biomasa se enfocan en arbolado adulto (Acosta-Mireles *et al.* 2002; Díaz-Franco *et al.* 2007; Návar-Chaídez, 2009; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011), con pocos trabajos orientados a la estimación de biomasa en la etapa de regeneración (Vargas-Larreta *et al.* 20017; Montes de Oca-Cano *et al.* 2009; Montes de Oca-Cano *et al.* 2012). Esta información es de especial interés, debido a la necesidad de conocer los montos de carbono capturado en los bosques durante todas sus etapas de crecimiento y fracciones del arbolado (Vargas-Larreta *et al.* 2017).

El objetivo del presente estudio fue desarrollar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa por fracciones de grosor de cuatro especies en etapa de regeneración en los ecosistemas mezclados e irregulares de Durango.

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en la Unidad de Manejo Forestal Regional (Umafor) 1008, ubicada al suroeste del estado de Durango, en las coordenadas geográficas 23°06'59'' y 24°11'38'' latitud norte y 105°55'56'' y 105°10'31'' longitud oeste. Comprende parte de los municipios Durango, San Dimas y Pueblo Nuevo; tiene una extensión superficial de 558 mil hectáreas, aproximadamente. En el área existen siete tipos de clima según la clasificación de Köpen modificada por García (1988), de los cuales predominan el templado subhúmedo C(w₂), semicálido subhúmedo (A) C(w₂) y semifrío subhúmedo Cb'(w₂); con precipitaciones de 800 a 1 200 mm anuales (SRNyMA-Conafor, 2007). Las comunidades vegetales más

importantes de la región están compuestas por bosque de pino, seguido de asociaciones pino-encino y en menor proporción las selvas bajas caducifolias, pastizales y el área de agricultura temporal (INEGI, 2012).

Toma de muestras para el análisis destructivo

Se seleccionaron 114 individuos regenerados: 30 de *Pinus cooperi* C.E. Blanco, 30 de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., 29 de *Juniperus deppeana* Steud. y 25 de *Arbutus arizonica* Sarg. Los ejemplares estaban libres de plagas, enfermedades, de defectos físicos y mecánicos; fueron elegidos aleatoriamente para que representaran la categoría de la etapa de regeneración y monte bravo, con diámetro de la base no mayor a 10 cm. Las variables dendrométricas que se midieron en campo, para cada árbol, fueron: diámetro de la base (*db*), diámetro a la altura del pecho (*dap*) y diámetro de copa (*dc*), con dos mediciones en cruz. Una vez derribados, se obtuvo la altura total (*h*), la altura de copa seca (*hcs*), la altura de copa viva (*hcv*), la longitud de copa seca (*lcs*) y la longitud de copa viva (*lcv*), como recomiendan Gómez-García *et al.* (2013). Todas las medidas se consideraron en centímetros.

Cada individuo fue derribado y guardado en bolsas herméticas de plástico con el fin de evitar la pérdida de humedad. Cada una se etiquetó con una clave de identificación integrada por el número del espécimen y la fecha de recolecta.

Análisis de laboratorio

Cada árbol fue separado en las siguientes fracciones de grosor: hojas, ramillas (<0.5 cm), ramas finas (>0.51 – 2.5 cm), tronco y ramas gruesas de > 2.51 cm. El peso total por fracción se obtuvo en verde, con una báscula con precisión (*Ohaus explorer* EX4202) de 0.001 g; para el peso de biomasa de ramillas y de hojas; mientras que para las fracciones ramas finas, ramas gruesas y tronco la precisión fue de 0.01 g. Las fracciones individuales se embolsaron y etiquetaron para, posteriormente, introducirlas en una estufa de secado (Felisa FE-294A), durante 8 a 10 días, a una temperatura de 75 °C hasta obtener el peso seco constante.

Ajuste de ecuaciones de biomasa

Se realizó un análisis de regresión no lineal entre las variables medidas en campo (db , h , hcs , hcv , dc , dap , lcs y lcv) y las mediciones de carga por fracción (ramillas, ramas finas, ramas gruesas y tronco, hojas y total) efectuadas en laboratorio. Para la estimación del peso seco se probaron diferentes ecuaciones no lineales, con distintas combinaciones de variables predictivas, los mejores resultados se ajustaron por mínimos cuadrados, mediante el procedimiento *MODEL* del programa SAS/ETS® (SAS, 2009).

Las ecuaciones por fracción de grosor y total se ajustaron, simultáneamente, para garantizar la aditividad (Álvarez-González et al., 2007). Esta es una de las propiedades más importantes que deben cumplir las ecuaciones de biomasa de los distintos componentes (Cunia, 1986; Parresol, 1999; Antonio et al. 2007); consiste en que la suma de las estimaciones de los pesos de todos los componentes o fracciones deben ser iguales a la estimación del peso total del árbol. Lo anterior se logra a través del ajuste simultáneo de los diferentes modelos matemáticos propuestos para cada fracción. La técnica se basa en el ajuste de un sistema de ecuaciones, aparentemente, no relacionadas y formado por las funciones de regresión de los k componentes arbóreos junto con el de biomasa total (Álvarez-González et al. 2007).

$$\begin{aligned}\hat{w}_1 &= f_1(x_1) \\ \hat{w}_2 &= f_2(x_2) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \hat{w}_k &= f_k(x_k) \\ \hat{w}_{total} &= f_{total}(x_1, x_2, \dots, x_k)\end{aligned}$$

Donde:

\hat{w}_k = Biomasa estimada

x_k = Conjunto de variables explicativas

En este sistema, no es necesario que las ecuaciones de cada fracción arbórea presenten la misma expresión matemática, ni las mismas variables predictivas. Las variables independientes del modelo de biomasa total son todas las regresoras que aparecen en las expresiones matemáticas de cada componente. Los parámetros de las ecuaciones se obtuvieron de forma simultánea con la metodología *Three-Stage Least Squares* (3SLS); para ello, se utilizó el procedimiento *MODEL* del programa SAS/ETS[®] (SAS, 2009). En el ajuste de modelos de biomasa es importante verificar la constancia de la varianza de los residuos (Picard *et al.*, 2012), para descartar problemas de heterocedasticidad; es decir, que la varianza de los errores no sea constante (Parresol, 2001).

Para analizar la presencia de heterocedasticidad se realizó el contraste de White (1980). La heterocedasticidad se corrige durante el ajuste de las ecuaciones, al pesar cada observación por la inversa de su varianza (σ_i^2). Al desconocerse dicha varianza, se asume que es factible modelarla con una función potencial $\sigma_i^2 = x_i^k$, donde x_i es una función de una o más de las variables independientes del modelo. El valor k del exponente y las variables a incluir (x_i) se determinan con

los errores del modelo ajustado sin pesos ($\hat{\epsilon}_i$), como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error (Park, 1966; Harvey 1976), y mediante la prueba de diferentes combinaciones de variables y exponentes, hasta optimizar el resultado del ajuste lineal derivado de tomar logaritmos en la siguiente expresión:

$$\hat{\epsilon}_i^2 = x_i^k \rightarrow \log \hat{\epsilon}_i^2 = \gamma + k \cdot \log x_i$$

Criterios de selección de modelos

Los criterios para determinar el mejor modelo fueron el análisis gráfico de los residuos; el coeficiente de determinación (R^2), que refleja la variabilidad total que es explicada; y la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) que analiza la precisión de las estimaciones, cuyas ecuaciones son las siguientes:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

Donde:

y_i , \hat{y}_i , e \bar{y}_i = Valor observado, estimado y promedio de la variable dependiente

n = Número total de observaciones utilizadas para ajustar el modelo

p = Número de parámetros del modelo

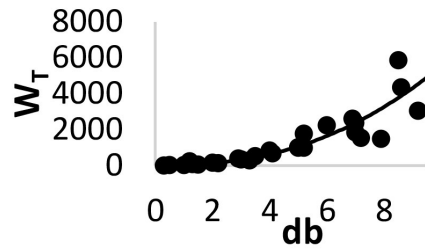
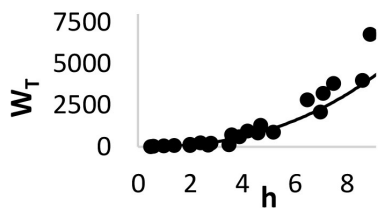
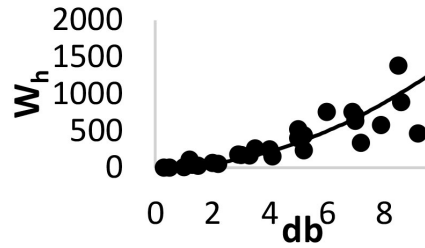
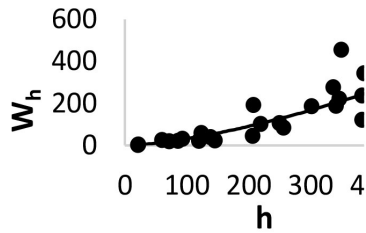
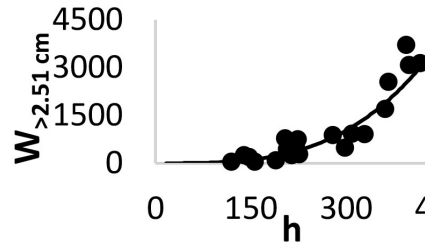
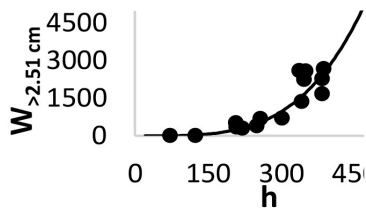
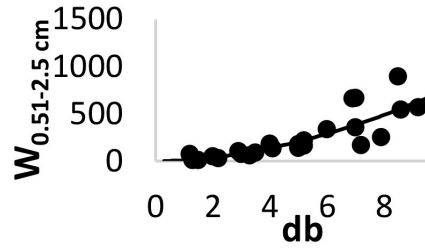
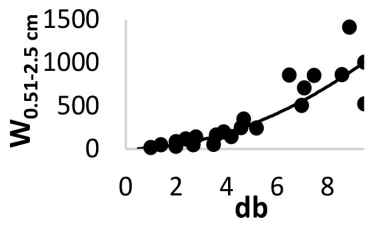
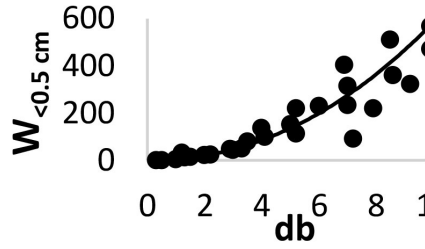
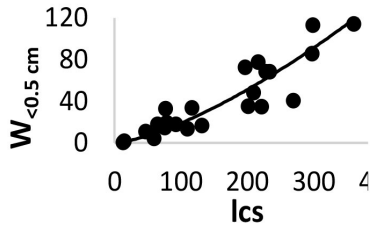
Además de los estadísticos descritos, una de las maneras más eficientes de evaluar la capacidad de ajuste de un modelo es la inspección visual, por lo que se analizaron los gráficos de residuos frente a valores predichos de la variable dependiente.

Resultados y Discusión

La representación gráfica de los valores de biomasa de fracciones por componente contra la variable independiente que mayor influencia tuvo en las ecuaciones alométricas se muestra en la Figura 1 para *Arbutus arizonica*, *Juniperus deppeana*, *Quercus sideroxyla* y *Pinus cooperi*.

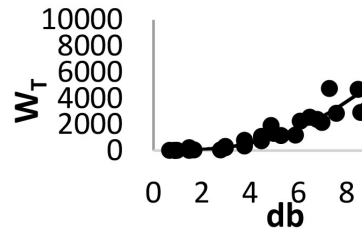
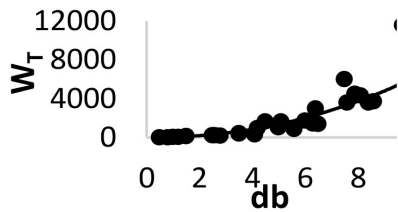
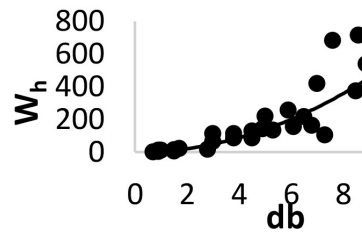
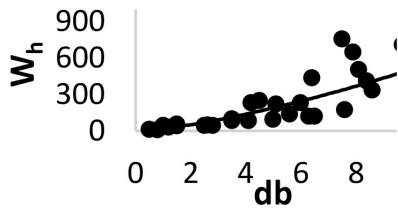
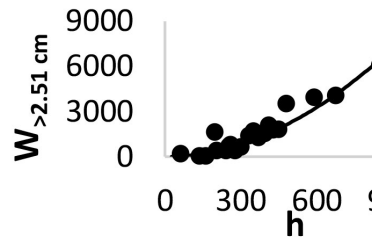
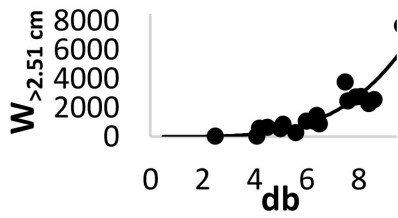
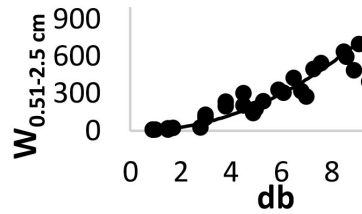
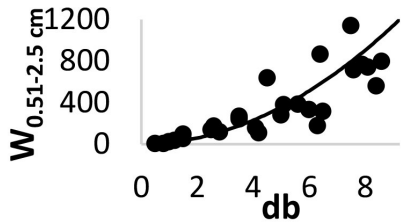
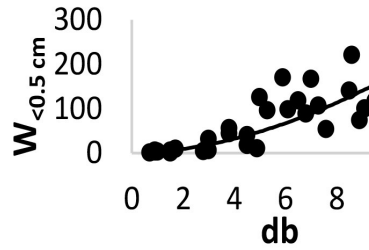
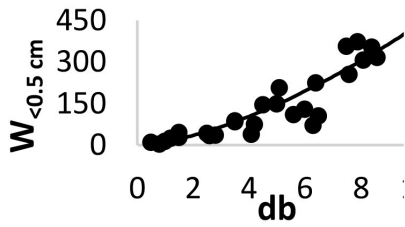
Arbutus arizonica

Juniperus deppeana



Quercus sideroxyla

Pinus cooperi



db = Diámetro de la base; h = Altura total; lcs = Longitud de copa seca; lcv = Longitud de copa viva; $W_{<0.5cm}$ = Peso ramas finas; $W_{0.51-2.5cm}$ = Peso ramas gruesas; $W_{>2.51cm}$ = Peso tronco, W_h = Peso hojas; W_T = Peso total.

Figura. 1. Relación entre la biomasa en gramos de los diferentes componentes con las variable explicativas con mayor influencia en el modelo por especi

La expresión de los modelos que mejores resultados mostraron en el ajuste individual por componente para la estimación de la biomasa por fracción de grosor y total para las especies estudiadas, se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos seleccionados para la estimación de la biomasa por fracción y total para la regeneración de *Juniperus deppeana* Steud., *Arbutus arizonica* Sarg., *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. y *Pinus cooperi* C.E. Blanco.



Especie	Componente	Modelo
<i>J. deppeana</i>	$W_{<0.5\text{ cm}}$	$W_{<0.5} = a_1 * db^{a_2} * dc$
	$W_{0.51-2.5\text{ cm}}$	$W_{0.51-2.5} = a_3 * db^{a_4} * lcv$
	$W_{>2.5\text{ cm}}$	$W_{>2.51} = a_5 * h^{a_6} * dc$
	W_h	$W_h = a_7 * db^{a_8} * lcv$
	W_T	$W_T = a_1 * db^{a_2} * dc + a_3 * db^{a_4} * lcv + a_5 * h^{a_6} * dc + a_7 * db^{a_8} * lcv$
<i>A. arizonica</i>	$W_{<0.5\text{ cm}}$	$W_{<0.5} = a_1 * lcs^{a_2}$
	$W_{0.51-2.5\text{ cm}}$	$W_{0.51-2.5} = a_3 * db^{a_4} * h$
	$W_{>2.5\text{ cm}}$	$W_{>2.51} = a_5 * h^{a_6} * db$
	W_h	$W_h = a_7 * h^{a_8} * db$
	W_T	$W_T = a_1 * db^{a_2} * lcs + a_3 * db^{a_4} * h + a_5 * h^{a_6} * db + a_7 * h^{a_8} * db$
<i>Q. sideroxylla</i>	$W_{<0.5\text{ cm}}$	$W_{<0.5} = a_1 * db^{a_2} * dc$
	$W_{0.51-2.5\text{ cm}}$	$W_{0.51-2.5} = a_3 * db^{a_4} * dc$
	$W_{>2.5\text{ cm}}$	$W_{>2.51} = a_5 * db^{a_6} * dc$
	W_h	$W_h = a_7 * db^{a_8} * dc$
	W_T	$W_T = a_1 * db^{a_2} * dc + a_3 * db^{a_4} * dc + a_5 * db^{a_6} * dc + a_7 * db^{a_8} * dc$
<i>P. cooperi</i>	$W_{<0.5\text{ cm}}$	$W_{<0.5} = a_1 * db^{a_2} * dc$
	$W_{0.51-2.5\text{ cm}}$	$W_{0.51-2.5} = a_3 * db^{a_4}$
	$W_{>2.5\text{ cm}}$	$W_{>2.51} = a_5 * h^{a_6} * db$
	W_h	$W_h = a_7 * db^{a_8} * dc^{a_9}$
	W_T	$W_T = a_1 * db^{a_2} * dc + a_3 * db^{a_4} + a_5 * h^{a_6} * db + a_7 * db^{a_8} * dc^{a_9}$

$W_{<0.5\text{ cm}}$ = Peso seco de ramillas (g); $W_{0.51-2.5\text{ cm}}$ = Peso seco de ramas finas (g); $W_{>2.51\text{ cm}}$ = Peso seco de ramas gruesas y tronco (g); W_h = Peso seco de hojas (g); W_T = Peso total (g); db = Diámetro de la base de cada planta (cm); h = Altura total de cada planta (cm); dc = Diámetro de copa de cada planta (cm); lcv = Longitud de copa viva de cada planta (cm); lcs = Longitud de copa seca de cada planta (cm).

En el Cuadro 2 se presentan las estimaciones de los parámetros obtenidos mediante el ajuste simultáneo, los errores estándar aproximados y los estadísticos de bondad del ajuste. Así como, los pesos utilizados en la ponderación para corregir la heterocedasticidad en las fracciones que presentaron este problema.

Cuadro 2. Estimación de los parámetros, y estadísticos de bondad del ajuste obtenidos para las ecuaciones de biomasa por fracción de grosor mediante el ajuste simultaneo por 3SLS.

Especie	Componente	Parám	Estimación	E.E	REMC (g)	Pesos	R ²
<i>J. deppeana</i>	Ramillas	a1	0.1957	0.0863	55.64		0.88
		a2	1.0708	0.2112			
	Ramas finas	a3	0.1441	0.0778	123.27		0.86
		a4	1.1372	0.2534			
	Ramas gruesas	a5	3.7E-6	4.8E-6	305.20	$1/\sqrt{(h)^{2.9}}$	0.92
		a6	2.5272	0.2181			
	Hojas	a7	0.2847	0.1387	162.94	$1/\sqrt{(db)^{2.1}}$	0.88
		a8	1.2422	0.2522			
	Peso Total				507.94		0.94
<i>A. arizonica</i>	Ramillas	a1	0.0073	0.0158	15.19		0.87
		a2	1.6580	0.3734			
	Ramas finas	a3	0.2060	0.0556	120.63	$1/\sqrt{(db)^{3.21}}$	0.90
		a4	1.1329	0.1420			
	Ramas gruesas	a5	0.0032	0.0040	268.43		0.95
		a6	1.9222	0.2058			
	Hojas	a7	0.3732	0.4947	69.95	$1/\sqrt{(h)^{2.4}}$	0.78
		a8	0.7810	0.2361			
	Peso Total				322.40		0.97

<i>Q. sideroxylla</i>	Ramillas	a1	0.0396	0.0174	80.93	$1/\sqrt{(db)^{1.9}}$	0.93
		a2	1.9577	0.2044			
	Ramas finas	a3	0.3768	0.0827	237.06	$1/\sqrt{(db)^{3.6}}$	0.88
		a4	1.2930	0.1181			
	Ramas gruesas	a5	0.0683	0.0291	598.09	$1/\sqrt{(db)^{3.7}}$	0.94
		a6	2.6210	0.2022			
	Hojas	a7	0.1640	0.0901	132.58		0.79
		a8	1.3279	0.2562			
Peso Total				905.08	$1/\sqrt{(db)^{2.5}}$	0.95	
<i>P. cooperi</i>	Ramillas	a1	0.1024	0.0652	35.75	$1/\sqrt{(db)^{1.12}}$	0.69
		a2	0.8569	0.2690			
	Ramas finas	a3	8.2417	1.6303	129.95	$1/\sqrt{(db)^{3.7}}$	0.79
		a4	2.0242	0.1038			
	Rama gruesas	a5	0.0817	0.0394	397.83		0.96
		a6	1.3391	0.0731			
	Hojas	a7	0.0255	0.0439	82.21	$1/\sqrt{(db)^{1.7}}$	0.84
		a8	1.1890	0.3194			
			a9	1.3917	0.3716		
Peso Total				354.47		0.97	

Parám = Parámetros del modelo por componente; E.E = Error estándar aproximado; REMC = Raíz del error medio cuadrático; R^2 = Coeficiente de determinación.

El ajuste simultáneo con la técnica 3SLS proporcionó una estimación de los estadísticos de bondad del ajuste muy similar al ajuste individual. La mayoría de las especies evidenciaron heterocedasticidad en la mayor parte de sus fracciones de biomasa. Problema que se corrigió mediante regresión ponderada, como en otros

trabajos de estimación de biomasa arbórea (Parresol, 2001; Álvarez-González et al. 2007). En algunas fracciones no se observó heterocedasticidad según la prueba de *White*; posiblemente, por el intervalo relativamente reducido de diámetros y pesos muestreados, ya que eran árboles jóvenes.

En la Figura 2 se presentan los valores observados frente a los predichos para las distintas fracciones de grosor, para las hojas y el peso total. La distribución de la nube de puntos sobre la diagonal indica que los modelos proporcionan estimaciones con bajo sesgo.

En general, las ecuaciones tuvieron un ajuste satisfactorio y explican como mínimo 69 % de la variabilidad observada. La biomasa de las fracciones de hojas y ramillas presentaron ajustes de buenos a regulares, lo que posiblemente se deba a la variabilidad de las estructuras de la copa y del número de ramas (Pardé, 1980). Para las fracciones de hojas y ramillas, los coeficientes de determinación fueron 0.84-0.69, 0.78-0.87, 0.88-0.88 y 0.79-0.93 para *P. cooperi*, *A. arizonica*, *J. deppeana* y *Q. sideroxylla*, respectivamente. Las fracciones de copa se consideraron las más difíciles de modelar (Muñoz et al., 2008).

Las bondades de los ajustes para *Pinus* son similares a las registradas en trabajos previos a nivel nacional en alometrías de biomasa para este género (Montes de Oca-Cano et al. 2009; Montes de Oca-Cano et al., 2012; Vargas-Larreta et al., 2017). Montes de Oca-Cano et al. (2009) realizaron el ajuste de ecuaciones de biomasa por componente para árboles de *Pinus durangensis*, cuyas edades eran de 3 a 10 años; sus resultados indicaron que el fuste tuvo los mejores estadísticos de ajuste, con un R^2 de 0.86, mientras que los coeficientes de determinación en las ramas y hojas fueron de 0.74 y 0.74, respectivamente. Valores similares documentaron Montes de Oca-Cano et al. (2012), con R^2 de 0.73 para las hojas; Vargas-Larreta et al. (2017) consignaron valores de R^2 de 0.74 para la fracción de hojas de *Pinus cooperi*, con las variables diámetro y altura. En el presente estudio, el valor de R^2 fue de 0.84 para las hojas de *Pinus cooperi*, lo que mejoró el ajuste, al agregar el diámetro de copa al modelo empleado.

Geudens *et al.* (2004), en *Pinus sylvestris* con edades de 1 a 4 años y las variables diámetro y altura (dap^2h) obtuvieron el mejor ajuste para la biomasa aérea con una R^2 de 0.95; resultados que se asemejan a los señalados en el presente documento, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.97. Vargas-Larreta *et al.* (2017) citan valores de R^2 para el mejor modelo de biomasa total de 0.94 y 0.90, respectivamente en la regeneración de *Pinus cooperi* y *P. leiophylla*, los cuales son muy similares a los de *P. cooperi* en este estudio.

Las bondades de los ajustes de *Quercus* concuerdan con lo registrado en la literatura. González (2008) estimó la biomasa para *Quercus* spp. en árboles seleccionados dentro de las categorías de regeneración natural de brinzales, con alturas de 2 m y latizales de hasta 21 m. El mejor modelo para estimar biomasa total incluyó como variable independiente el diámetro normal, con un coeficiente de determinación de 0.96. En el presente trabajo con ajuste simultáneo, el valor de R^2 fue igual (0.96). En el noroeste de España, Gómez-García *et al.* (2013), para *Quercus robur* L. estiman la biomasa por fracciones y peso total; el mejor ajuste para la fracción hojas lo obtuvieron al usar como variable explicativa el dap , $R^2 = 0.78$. Lo anterior concuerda con el coeficiente de determinación para las hojas de *Quercus* (0.79) calculado para Durango, mediante el uso de las variables predictoras db y dc .

En el género *Juniperus*, el uso del diámetro de base generó buenos resultados en trabajos previos. Así en Texas, Reemts (2013) con árboles pequeños (< 15 cm de diámetro basal) de *Juniperus ashei* J. Buchholz señala que las ecuaciones alométricas basadas en el db y db^2h ajustaron mejor la biomasa total que las expresiones generadas con base en la altura del árbol y el volumen de dosel ($R^2 = 0.95-0.97$ versus $R^2 = 0.71-0.77$). Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) obtuvieron coeficientes de determinación de 0.97 para *Juniperus flaccida* Schltl., a partir de un modelo potencial, cuya variable predictora fue el diámetro normal.

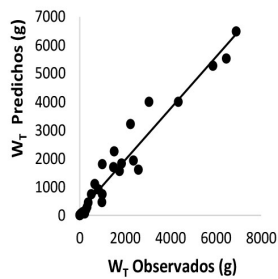
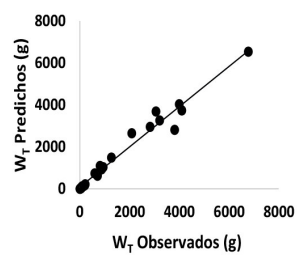
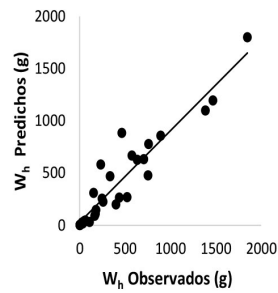
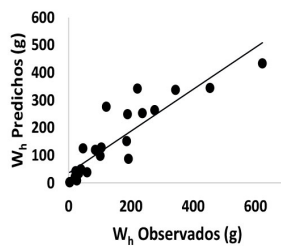
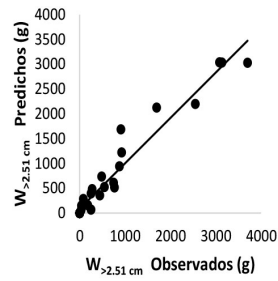
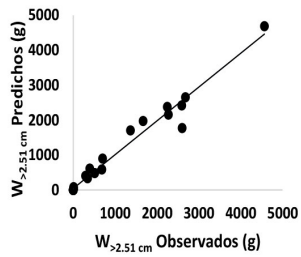
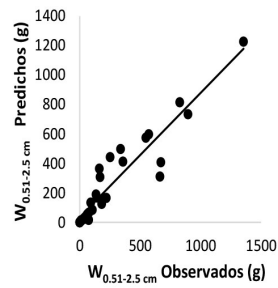
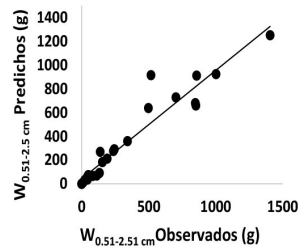
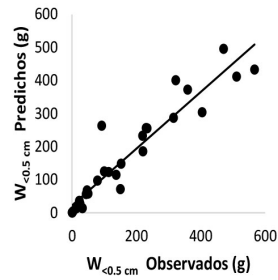
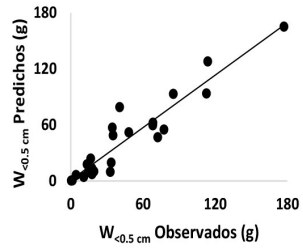
En general, los coeficientes de determinación para *Arbutus arizonica* fueron buenos, y el mejor correspondió al peso total, con un valor de R^2 de 0.97. Resultado similar

al de Harrington *et al.* (1984), quienes estimaron la biomasa total para *Arbutus menziesii* Pursh con la variable explicativa de diámetro normal y un coeficiente de determinación de 0.97. Vargas-Larreta *et al.* (2017) registran coeficientes de determinación de 0.74 y 0.92 para hojas y peso total, respectivamente para *Arbutus bicolor* S. González, M. González & P.D. Sørensen, sus variables predictoras fueron el diámetro y la altura. Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997) consignan coeficientes de determinación de 0.83 para *Arbutus menziesii* en la biomasa de las hojas, cuando se usó como variable predictora el diámetro a la altura del pecho. En el estudio que aquí se documenta, el ajuste para las hojas explicó 78 % de la variabilidad observada.



Arbutus arizonica

Juniperus deppeana



Quercus sideroxyla

Pinus cooperi

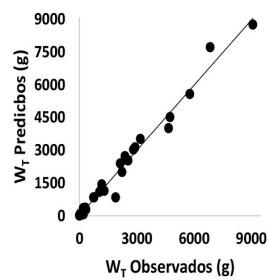
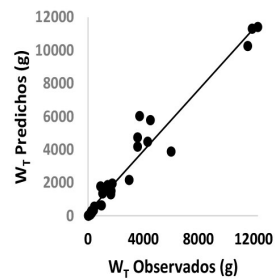
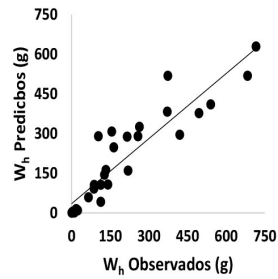
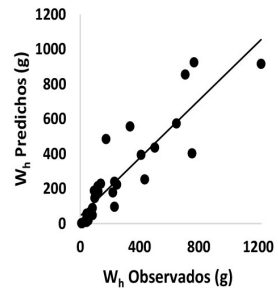
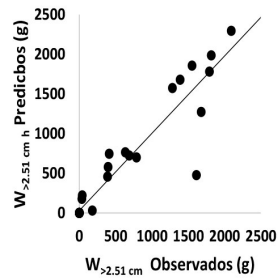
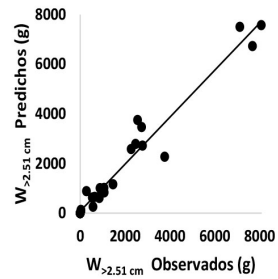
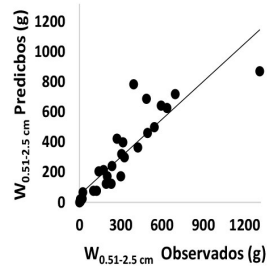
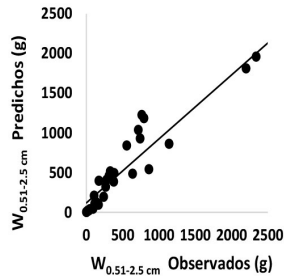
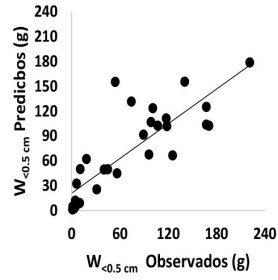
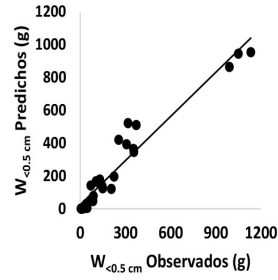


Figura 2. Gráficos de valores observados frente a predichos de biomasa por fracción de grosor, hojas y biomasa total de las cuatro especies estudiadas.

Aunque el diámetro de la base fue la mejor variable explicativa para todos los componentes de la biomasa, la altura y la longitud de copa viva y muerta mejoraron los modelos alométricos para las fracciones de ramas y hojas; similarmente, a lo observado en otros trabajos (Williams *et al.*, 2005; Antonio *et al.*, 2007; Paul *et al.*, 2008; Vega-Nieva *et al.*, 2015), pero a expensas de un mayor esfuerzo de muestreo para aplicar los modelos (Gómez-García *et al.*, 2013).

Conclusiones

Se desarrollaron sistemas de ecuaciones para estimar biomasa por fracción de grosor y total para individuos en la etapa de regeneración de las especies *Arbutus arizonica*, *Juniperus*, *Quercus sideroxyla* y *Pinus cooperi*. Estas ecuaciones permitirán realizar estimaciones no destructivas de la biomasa de las cuatro especies estudiadas, y mejorar las estimaciones de alocación de biomasa, carbono y nutrientes por fracciones en los diferentes estadios de las masas forestales. Es importante continuar con el trabajo y mejora de este tipo de modelos, así como estudiar la biomasa de masas regeneradas de otras especies de relevancia.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el apoyo financiero otorgado al primer autor para estudiar en el programa de Maestría en Ciencias Forestales y Agropecuarias de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Se agradece el apoyo del proyecto "Caracterización y Clasificación de Combustibles para Generar y Validar Modelos de Combustibles Forestales para México", clave 251694, del fondo Conafor-Conacyt. Se agradece el apoyo del proyecto "Desarrollo de Modelos para la Predicción de Cargas Forestales en Durango" del Programa para el Desarrollo del Personal Docente de Tipo Superior (PRODEP) 2015.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Favian Flores Medina: trabajo de campo y elaboración del manuscrito; Daniel José Vega-Nieva: diseño experimental, revisión del manuscrito y coordinación de las revisiones; Juan Gabriel Álvarez-González, Ana Daria Ruiz-González, Carlos Antonio López-Sánchez, José Javier Corral-Rivas y Artemio Carillo Parra: revisión del manuscrito y análisis estadístico.

Referencias

Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velásquez-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.

Aguirre-Calderón, O. A. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosque del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 73-84.

Álvarez-González, J. G., R. Rodríguez-Soalleiro y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 35-42

Álvarez G., J. G., M. A. Balboa M., A. Merino y R. Rodríguez S. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais* 1(1):21-30.

Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares and L. Fontes. 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 37:895–906.

Brañas, J., F. González-Río y A. Merino. 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del Noroeste de la Península Ibérica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 9:316–335.

Cunia, T. 1986. Construction of tree biomass tables by linear regression techniques. *In: Wharton, E. H. (comp.). Estimating tree biomass regressions and their error. Proceedings of the Workshop on tree biomass regression functions and their*

contribution to the error of forest inventory estimates. 27-37 May. Syracuse, NY, USA. 30 p.

Dambrine, E., J. A. Vega, T. Taboada, L. Rodríguez, C. Fernández, F. Macías and J. M. Gras. 2000. Bilans d'éléments minéraux dans de petits bassins versants forestiers de Galice (NW Espagne). *Annals of Forest Science* 57(1): 23–38.

Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.

Fontes, L., J. Landsberg, J. Tome, M. Tome, C. A. Pacheco, P. Soares and C. Araujo. 2006. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 36(12): 3209–3221.

García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 4^a ed. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 217 p.

Geudens, G., J. Staelens, V. Kint, R. Goris and N. Lust. 2004. Allometric biomass equations for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings during the first years of establishment in dense natural regeneration. *Annals of Forest Science* 61(7):653-659.

Gómez-García, E., F. Crecente-Campo y U. Diéguez-Aranda. 2013. Tarifa de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. *Madera y Bosques* 19(1):71-91.

González, Z. M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Magister Scientiae en

Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 97 p.

González-García, M., A. Hevia, J. Majada and M. Barrio-Anta. 2013. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy* 54: 147–57.

Harrington, T. B., J. C. Tappeiner II and J. D. Walstad. 1984. Predicting leaf area and biomass of 1-to 6-year-old tanoak (*Lithocarpus densiflorus*) and Pacific madrone (*Arbutus menziesii*) sprout clumps in southwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 14(2):209-213.

Harvey, A. C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012. Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000 Serie V, Información vectorial. México, D.F., México. s/p.

Jiménez, E., J. A. Vega, J. M. Fernández-Alonso, D. Vega-Nieva, J. G. Álvarez-González and A. D. Ruiz-González. 2013. Allometric equations for estimating canopy fuel load and distribution of pole-size maritime pine trees in five Iberian provenances. *Canadian Journal of Forest Research* 43(2): 149–158.

Laclau, J. P., B. Jean-Pierre and J. Ranger. 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management* 128(3):181–196.

Merino, A., C. Rey, J. Brañas y R. Rodríguez-Soalleiro. 2003. Biomasa aérea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 12 (2): 85-89.

- Merino, A., M. A. Balboa, R. Rodríguez-Soalleiro and J. G. Álvarez-González. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management* 207(3): 325–339.
- Montes de Oca-Cano, E., P. García-Ramírez, J. A. Nájera-Luna y J. Méndez-González. 2009. Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 65-71.
- Montes de Oca-Cano, E., M. Rojas-Ascensión, P. García-Ramírez, J. A. Nájera-Luna, J. Méndez-González y J. J. Graciano-Luna. 2012. Estimación de carbono almacenado en la regeneración natural de *Pinus durangensis* Martínez en el Salto, Durango. *Colombia Forestal* 15(2):151-159
- Morfín-Ríos, J. E., E. J. Jardel-Peláez, E. Alvarado-Celestino y J. M. Michel-Fuentes. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México. 94 p.
- Muñoz, F., R. Rubilar, M. Espinosa, J. Cancino, J. Toro and M. Herrera. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management* 255(3-4): 365–73.
- Návar-Cháidez, J. J. 2009. Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 45-52.
- Pardé, J. 1980. Forest biomass. *Forestry Abstracts* 41(8): 343–362.
- Park, R. E. 1966. Estimation with Heteroscedastic Error Terms. *Econometrica* 34(4):888.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45: 573-593.

Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 865-878.

Paul, K. I., K. Jacobsen, V. Koul, P. Leppert and J. Smith. 2008. Predicting growth and sequestration of carbon by plantations growing in regions of low-rainfall in southern Australia. *Forest Ecology and Management* 254(2):205–216.

Pérez-Cruzado, C. and R. Rodríguez-Soalleiro. 2011a. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: effect of bole sampling intensity and explanatory variables. *Forest Ecology and Management* 261(11):2016-2028.

Pérez-Cruzado, C., A. Merino and R. Rodríguez-Soalleiro. 2011b. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass and Bioenergy* 35(7): 2839–2851.

Picard, N., L. Saint-André y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Rome, Montpellier. 223 p.

Reed, D. and M. Tomé. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management* 103(1): 21-32

Reemts, C. M. 2013. Allometric equations for ashe juniper (*Juniperus ashei*) of small diameter. *The Southwestern Naturalist* 58(3): 359-363.

Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño-Garza y R. Rozo-Zárata. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5 (3): 317-327.

Ruiz-Díaz, C., G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Leyva-López y J. Enríquez-del Valle. 2014. Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales en México. *Naturaleza y Desarrollo* 12(1): 28-45.

Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente-Comisión Nacional Forestal (SRNyMA-Conafor). 2007. Plan Estratégico Forestal 2030. Gobierno del estado de Durango. Durango, Dgo., México. 198 p.

Static Analysis System (SAS). 2009. SAS/STAT® Ver. 9.2. User's Guide 2nd ed. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 7869 p.

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

Ter-Mikaelian, M. T. and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97(1):1-24.

Vargas-Larreta, B., C. A. López-Sánchez, J. J. Corral-Rivas, J. O. López Martínez, C. G. Aguirre-Calderón and J. G. Álvarez-González. 2017. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico. *Forests* 8, 269. doi: 10.3390/f8080269.

Vega-Nieva, D., E. Valero, J. Picos and E. Jiménez. 2015. Modeling the above and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. *Annals of Forest Science* 72(7):967-980.

Williams, R. J., A. Zerihun, K. D. Montagu, M. Hoffman, L. B. Hutley and X. Chen. 2005. Allometry for estimating aboveground tree biomass in tropical and subtropical

eucalypt woodlands: towards general predictive equations. Australian Journal of Botany 53:607–619.

White, H. 1980. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. Econometrica 48(4): 817-838.