

INFLUENCIA DE VARIABLES FISIOGRAFICAS EN LA PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA AÉREA EN BOSQUES MIXTOS¹

[INFLUENCE OF PHYSIOGRAPHIC VARIABLES IN THE ABOVEGROUND BIOMASS PRODUCTIVITY IN MIXED FORESTS]

Juan Ángel García-Aguilar^{1§}, Gerardo Rodríguez-Ortiz², Judith Martínez-de la Cruz¹

¹Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. México. C.P. 71230, Tel. 01(951)5170444. ²División de Estudios de Posgrado e Investigación-ITVO. [§]Autor para correspondencia: (gaja_9010@hotmail.com)

RESUMEN

Los bosques mixtos almacenan carbono en la biomasa y suelo, lo que permite reducir la contaminación por CO₂. En este sentido el objetivo fue desarrollar modelos alométricos para estimar biomasa aérea y la influencia de variables fisiográficas en la productividad de especies arbóreas en bosques de encino-pino en la Sierra Norte de Oaxaca. En 2013, en un rodal de 644 ha se ubicaron 30 sitios de 250 m² para realizar un inventario forestal utilizando muestreo aleatorio simple. Se midieron variables dendrométricas para calcular volumen, además se analizaron variables fisiográficas para determinar influencia de ellas sobre la productividad de la biomasa. Con el muestreo destructivo de 25 árboles de 14 especies se estimó la biomasa mediante modelos alométricos y por unidad de área. Se realizó un análisis de varianza para los factores fisiográficos ($p < 0.05$) y se utilizó la prueba de independencia de χ^2 ($p = 0.05$). Los modelos utilizados mostraron R² ajustado entre 0.84 y 0.34 en los diferentes componentes. De acuerdo con las pruebas estadísticas realizadas, la exposición y altitud influyeron en varios de los componentes aéreos de biomasa, encontrándose valores mayores en exposición sur 913.1 t ha⁻¹ y altitudes de 2630 a 2900 m.

Palabras clave: grupo de especies, modelos alométricos, muestreo destructivo.

ABSTRACT

The mixed forests stored carbon on biomass and soil, thus reducing CO₂ pollution. For this reason, the objective was to develop allometric models to estimate aboveground biomass and the influence of physiographic variables on productivity of tree species in oak-pine forests in the Sierra Norte of Oaxaca. In 2013, in a stand of 644 ha 30 sample-sites of 250 m² were located to conduct a forest inventory using simple random sampling. Dendrometric variables were measured in order to calculate volume, moreover, physiographical variables were analyzed to determine its influence on biomass productivity. With the destructive sampling of 25 trees of 14 species, biomass was estimated using allometric models and per unit area. An analysis of variance for physiographic factors ($p < 0.05$) was performed and the independence of χ^2 ($p = 0.05$) was used. The models used showed R² adjusted between 0.84 and 0.34 in the different components. According to statistical tests performed, the exposition and altitude influenced some

¹ Recibido: 13 de julio de 2015.

Aceptado: 09 de septiembre de 2015.

aboveground biomass components, being higher values in southern exposures 913.1 t ha^{-1} and altitudes of 2630-2900 m.

Index words: *species group, allometric models, destructive sampling.*

INTRODUCCIÓN

El clima en nuestro planeta presenta evolución natural continua, pero a ritmo lento; sin embargo, durante el medio siglo reciente los cambios se han acelerado debido al aumento en los niveles de dióxido de carbono (CO_2) y de otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, consecuencia de las actividades humanas (Benjamín y Masera, 2001; Dávalos *et al.*, 2008; Ordóñez, 2008). El panorama es crítico, pero Álvarez (2008) y Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) indican que los bosques contribuyen potencialmente aminorar el cambio climático global, dado que almacenan grandes cantidades de C en la vegetación y el suelo en forma de biomasa; es decir, intercambian este elemento con la atmósfera a través de la fotosíntesis.

La biomasa es uno de los indicadores que muestra la situación actual de la productividad en los bosques, cuantificar y estimar esos valores es realmente importante. Puesto que los componentes de los árboles con mayor contenido de biomasa son: tallo, ramas, ramillas, hojas y corteza (Yerena-Yamallel *et al.*, 2011; Pardo-Toledo *et al.*, 2014). Las metodologías más precisas y recomendables para analizar la biomasa aérea de un árbol están basadas en muestreos destructivos, para generar ecuaciones alométricas de mayor precisión (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Monroy y Návar, 2004; Vidal *et al.*, 2004; Vallejo *et al.*, 2007).

La evaluación de biomasa mediante modelos alométricos ayuda a tomar decisiones en la política ambiental y gestión forestal, por lo que los bosques se han vuelto un campo de estudio importante para la comunidad científica. En particular, los bosques mixtos son analizados para determinar el tipo de ecuación alométrica adecuada para estimar con precisión la biomasa. Debido a que estos bosques poseen gran diversidad de especies y hace complicado generar un modelo para cada una (Acosta-Mireles *et al.*, 2009). En tanto, para optimizar tiempos y costos se recomienda agrupar a las especies y construir un modelo que estime de manera confiable (Delgado *et al.*, 2005; Cuenca *et al.*, 2014).

Martínez-Salvador *et al.* (2013) afirman que existe un creciente interés por conocer la influencia de factores fisiográficos sobre el crecimiento de especies y productividad de los bosques. Debido a que estudios muestran que existe relación entre el crecimiento de las especies y variables como altitud, pendiente y exposición (Griffiths *et al.*, 2009). El manejo sustentable de los bosques requiere del conocimiento de factores fisiográficos que influyen en la productividad de biomasa en las especies (Vilá *et al.*, 2007). En especial en los bosques mixtos, debido a que en ellos se ha encontrado mayor productividad de biomasa, gracias a la complejidad estructural de las comunidades de árboles en el uso diferencial de los recursos (Návar-Cháidez y González-Elizondo, 2009; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011). Por lo que, en este estudio se plantearon dos objetivos: 1) Desarrollar modelos alométricos para estimar biomasa aérea para mezclas de especies arbóreas en bosques de encino-pino en la Sierra Norte de Oaxaca, y, 2) determinar la influencia de variables fisiográficas sobre la productividad de biomasa aérea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en una superficie boscosa de 644 ha del municipio de Santa María Tlahuitoltepec, localizado al noreste del estado de Oaxaca a 17° 03' - 17° 10' LN y 95° 58' - 96° 09' LO y altitud entre 1 000 a 3 400 m (Figura 1). El relieve es sumamente accidentado, con pendientes que van de 26 a 45%, rodeado de montañas y lomeríos con profundidades, barrancos y laderas, por formar parte de la prolongación de la Sierra Madre Oriental. La vegetación natural se encuentra en proceso de alteración considerable y contiene: *Pinus oaxacana* Mirov., *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl., *Quercus elliptica* Née., *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., *Quercus laurina* Humb et Bonpl., *Arbutus xalapensis* H.B.K., *Comarostaphylis* sp., *Pinus patula* Schl. et Cham., *Quercus castanea* Née., *Alnus acuminata* Kunth., *Quercus acutifolia* Née., *Quercus salicifolia* Née., *Pinus oocarpa* Shiede., *Quercus rugosa* Née.

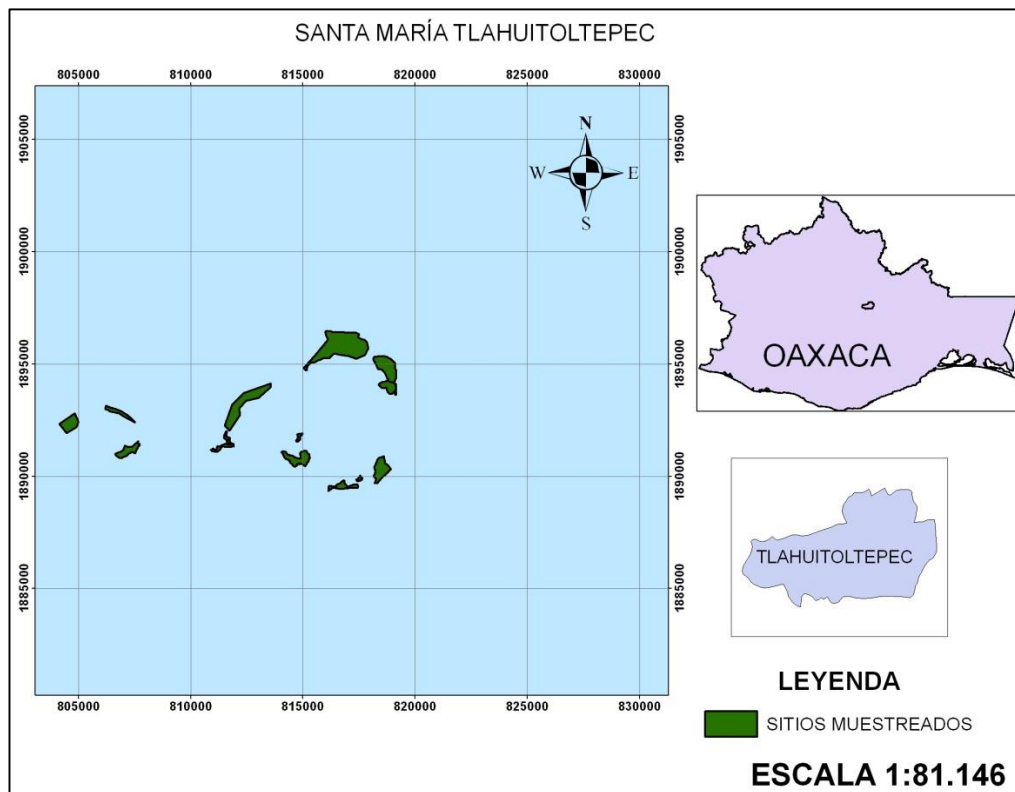


Figura 1. Localización del área de estudio.

Inventario y muestreo destructivo

La metodología utilizada fue la propuesta por Schlegel *et al.* (2001) modificada para las condiciones del estudio. Se delimitó el área boscosa a inventariar (644 ha), utilizando un diseño de muestreo al azar simple, en donde se distribuyó un total de $n = 30$ unidades muestrales circulares de 250 m². En cada sitio se midieron todos los árboles >10 cm de diámetro normal (DN, en cm), altura total (m); además, se tomaron datos de sitio: altura sobre el nivel del mar (m), exposición y pendiente (%).

Para muestreo destructivo se eligió una muestra de 25 árboles en forma proporcional a la frecuencia absoluta de cada clase diamétrica y por especie determinada en el inventario, considerando de 1 a 5 individuos por especie. Se comenzó midiendo variables en pie, altura total (HT, en m) y DN; luego, los árboles fueron derribados, troceados y separados en los componentes: hojas, ramas y fuste+corteza. El fuste con corteza fue cubicado con la fórmula de Newton (Romahn y Ramírez, 2006) y se le extrajo de la parte media del tallo una rodaja de 5 cm de espesor para calcular gravedad específica, GE (g cm^{-3}), con el método utilizado por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2011). El total de ramas y hojas fueron pesadas en estado fresco con báscula romana Rotter® con capacidad de 50 kg y precisión de 0.1 kg. De cada componente se obtuvieron muestras para obtener peso fresco (Pv, g), las que posteriormente se colocaron a temperatura constante de 75 y 102°C, en una estufa de secado marca Memmert® modelo UFP800DW hasta alcanzar peso constante, se determinó su peso seco (Ps, g) como lo describe Arreaga (2002).

La biomasa de fuste+corteza se obtuvo con el producto de volumen total por árbol y GE. Finalmente, en las hojas y ramas se utilizó el factor de conversión $B = (Ps/Pv) (Pt) / 1000$, donde: B (kg) = biomasa, Ps (g) = peso seco de la muestra, Pv (g) = peso fresco de la muestra, Pt (g) = peso total del componente/árbol.

Modelos alométricos para estimar biomasa

Se ajustaron 11 modelos alométricos usados por Prodan *et al.* (1997), Acosta (2003) y Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) para cada componente. Para la rutina de análisis de regresión se usó el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) SAS Institute Inc (2004); se usaron los procedimientos: MODEL, REG y NLIN, según el requerimiento del modelo lineal y no lineal. La muestra contempló 14 especies arbóreas del bosque mixto: *Pinus oaxacana*, *Quercus crassifolia*, *Quercus elliptica*, *Pinus leiophylla*, *Quercus laurina*, *Arbutus xalapensis*, *Comarostaphylis* sp., *Pinus patula*, *Quercus castanea*, *Alnus acuminata*, *Quercus acutifolia*, *Quercus salicifolia*, *Pinus oocarpa*, *Quercus rugosa*.

Los modelos alométricos estimaron la biomasa de cada componente aéreo (hojas, ramas, tallo+corteza) y total aéreo, como funciones de DN y HT de los individuos. Las ecuaciones se evaluaron con los siguientes estadísticos de bondad de ajuste: coeficiente de determinación (R^2) y (R^2) ajustado, error estándar (δ_{yx}) y coeficiente de variación. Los mejores modelos se aplicaron al inventario para estimar biomasa por individuo y unidad de área.

Los datos de biomasa estimados fueron procesados con el paquete estadístico SAS, utilizando los procedimientos SORT, FREQ y MEANS, para obtener estadísticos básicos y calcular precisión y error de muestreo por cada componente. Además, se realizó un análisis de varianza para los factores fisiográficos ($p < 0.05$): exposición, pendiente y altitud, agrupándolos en categorías, a las cuales se les realizó la prueba de comparación de medias de Duncan ($p = 0.05$); se utilizó la prueba de independencia de χ^2 ($p = 0.05$) para determinar la influencia de las variables fisiográficas sobre la productividad de biomasa en los componentes del árbol.

RESULTADOS

Modelos para estimar biomasa

Los modelos que mejor estimaron la biomasa fueron los siguientes: en el fuste, Schumacher-Hall (R^2 ajustado de 0.84 y E.E = 114.2); para el componente rama el R^2 ajustado disminuyó a 0.42 y error estándar de 23.44; y para el follaje se determinó el modelo Logarítmico como el más adecuado puesto que posee buenos estimadores (R^2 ajustado y error estándar de 0.34 y 15.73, respectivamente). Todos estos mostraron significancia ($p < 0.0001$), por lo que las variables DN y HT predicen confiablemente la biomasa de los componentes respectivos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos alométricos para estimar biomasa arbórea de especies mezcladas del bosque de encino-pino.

Nombre	Compo- nente	Modelo	δ_{yx}	R^2	R^2_{aj}	CME	β_0	β_1	β_2	β_3
Schumacher -Hall	Fuste	$B = \beta_0 \times DN^{\beta_1} \times HT^{\beta_2}$	114.2	0.86	0.84	13046.4	1.44	1.05	1.19	---
Schumacher -Hall	Ramas	$B = \beta_0 \times DN^{\beta_1} \times HT^{\beta_2}$	23.44	0.84	0.42	549.5	0.73	1.50	0.03	---
Logarítmico	Hojas	$B = \beta_1 \times (DN^{\beta_2}) \times (HT)^{\beta_3}$	15.73	0.73	0.34	247.5	---	0.23	2.05	-0.48

B= biomasa (kg); HT= altura total (m); DN= diámetro normal (cm); $\beta_{0,1,2,3}$ = coeficientes de regresión; R^2 = coeficiente de determinación; R^2_{aj} = coeficiente de determinación ajustado; δ_{yx} = error estándar; CME = cuadrados medios del error.

Biomasa en relación a los factores fisiográficos

La vegetación arbórea que mostró mayor productividad de biomasa total aérea fue la ubicada en exposición sur, con un total de 913.1 t ha⁻¹ ($p = 0.0006$) con ausencia de error estándar debido a que no hubo más que un solo sitio en esa exposición. Los demás sitios arbolados no mostraron diferencias en este compartimento, encontrando menor valor en la exposición suroeste con 123.2 t ha⁻¹ y un error estándar de 60.63. Por lo que la exposición tiene alta influencia ($p \leq 0.03$) en la productividad de biomasa de tallo+corteza, ramas y total aéreo (Cuadro 2).

La vegetación arbórea ubicada en elevaciones desde 2630 a 2904 msnm presentaron en promedio mayor contenido de biomasa (332 t ha⁻¹ con un error de 248.32) sin influencia en la productividad de biomasa ($p = 0.06$). Mientras que la vegetación arbórea ubicada entre 1809 a 2082m, con 91 t ha⁻¹ y un error estándar de 43.83. Por otro lado, la altitud influyó en los componentes ramas y hojas con ($p = 0.01$ y 0.03 respectivamente). Los sitios arbolados mostraron creciente biomasa total en relación positiva con la altura sobre el nivel del mar en que se ubicaron los sitios, en el rango de 1800 a 2900 msnm (Cuadro 3).

Cuadro 2. Biomasa de los componentes aéreos por exposición del sitio.

Exposición	Biomasa (t ha ⁻¹) y significancia			
	Fuste+corteza (0.0004)	Ramas (0.03)	Hojas (0.22)	Total (0.0006)
Sur	848.78 ± 0 a	47.13 ± 0 a	17.20 ± 0 a	913.1 ± 0 a
Este	326.18 ± 35.05 b	25.41 ± 3.19 b	12.09 ± 4.95 ab	363.7 ± 26.90 b
Sureste	221.57 ± 161.23 b	20.41 ± 10.80 b	9.20 ± 4.67 b	251.2 ± 175.36 b
Oeste	218.51 ± 150.98 b	17.72 ± 6.24 b	7.76 ± 1.71 b	244 ± 158.95 b
Norte	212.18 ± 57.33 b	20.56 ± 6.71 b	11.11 ± 4.40 ba	243.9 ± 68.45 b
Noreste	175.83 ± 132.79 b	14.02 ± 5.69 b	6.22 ± 2.54 b	196.1 ± 140.49 b
Noroeste	141.22 ± 95.12 b	17.99 ± 8.73 b	9.09 ± 4.54 b	168.3 ± 106.65 b
Suroeste	101.5 ± 51.37 b	14.36 ± 6.36 b	7.37 ± 3.35 b	123.2 ± 60.63 b
CV	55.66	41.51	44.48	53.18

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). La media se acompaña de ± la desviación estándar.

Cuadro 3. Biomasa de los componentes aéreos en relación a la altitud.

Categoría de altitud (m)	Biomasa (t ha ⁻¹) y significancia			
	Fuste (0.07)	Ramas (0.01)	Hojas (0.03)	Total (0.06)
(1800, 2080]	76.4 ± 38.28 a	9.66 ± 3.88 b	4.93 ± 2.40 b	91 ± 43.83 b
(2080, 2350]	153.9 ± 25.09 a	15.53 ± 0.40 ab	7.01 ± 1.39ba	176.4 ± 26.89 ba
(2350, 2630]	192.4 ± 120.03 a	19.22 ± 6.85 ba	9.4 ± 3.54 ba	221.1 ± 127.59 ba
(2630, 2900]	297 ± 234.61 a	24.12 ± 11.36 a	10.79 ± 4.64 a	332 ± 248.32 a
CV	78.05	43.27	42.10	72.76

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). La media se acompaña de ± la desviación estándar.

Cuadro 4. Biomasa de los componentes en relación a la pendiente.

Categoría de Pendiente (%)	Biomasa (t ha ⁻¹) y significancia			
	Fuste (0.46)	Ramas (0.48)	Hojas (0.61)	Total (0.469)
(18 a 26]	120.69 ± 96.06 a	14.90 ± 8.24 a	7 ± 3.68 a	142.6 ± 107.38 a
(26.1 a 34]	292.81 ± 370.78 a	23.74 ± 15.79 a	10.38 ± 4.92 a	326.9 ± 391.01 a
(34.1 a 42]	192.80 ± 138.20 a	16.90 ± 8.48 a	8.50 ± 4.70a	218.2 ± 148.97 a
(42.1 a 50]	207.38 ± 114.07 a	19.49 ± 7.70 a	9.22 ± 3.93 a	236.1 ± 122.78 a
CV	84.57	49.98	47.91	79.3

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). La media se acompaña de ± la desviación estándar.

Las masas arboladas que poseen los mayores almacenes de biomasa, se ubicaron en categoría de pendiente que va de 26 a 34% con un total de 326.9 t ha⁻¹. Mientras que la masa arbolada que acumuló la menor biomasa es la que está en un rango de 18 a 26%, con un total de 142 t ha⁻¹ y un error estándar de 107.38. En relación a la prueba de comparación de medias Duncan no hay

diferencias significativas entre la categoría de pendiente y los componentes aéreos. Por lo que la pendiente no influyó en la productividad de biomasa (Cuadro 4).

Cuadro 5. Frecuencia absoluta y relativa de especies por grupo de exposición.

Especie	Este	Exposición							Total
		Noreste	Noroeste	Norte	Oeste	Sur	Sureste	Suroeste	
Aacu	-	(3) 0.0156	(11) 0.0573	-	-	-	(8) 0.0417	-	(22) 0.1146
Ax	-	(1) 0.0052	(12) 0.0625	-	-	-	-	(5) 0.026	(18) 0.0938
Co	-	(3) 0.0156	-	-	-	-	-	-	(3) 0.0156
Plei	-	(12) 0.0625	-	(2) 0.0104	-	-	(7) 0.0365	(6) 0.0313	(27) 0.1406
Po	-	(2) 0.0104	(12) 0.0625	(3) 0.0156	-	-	-	-	(17) 0.0885
Poca	-	(1) 0.0052	(3) 0.0156	-	(2) 0.0104	-	-	(5) 0.026	(11) 0.0573
Ppa	(8) 0.0417	-	-	-	-	-	(8) 0.0417	-	(16) 0.0883
Qacu	-	-	-	-	-	(5) 0.026	-	-	(5) 0.026
Qca	-	-	-	(1) 0.0052	-	-	(3) 0.0156	-	(4) 0.0208
Qcra	-	(6) 0.0313	(3) 0.0156	(1) 0.0052	(6) 0.0313	(2) 0.0104	-	(4) 0.0208	(22) 0.1146
Qe	-	-	-	-	(4) 0.0208	(5) 0.026	-	-	(9) 0.0469
Qlau	(3) 0.0156	(3) 0.0156	-	-	-	-	-	(1) 0.0052	(7) 0.0365
Qru	-	-	(13) 0.0677	-	-	-	-	(8) 0.0417	(21) 0.1094
Qsal	-	-	(5) 0.026	-	-	-	(5) 0.026	-	(10) 0.0521
Total	0.0573	0.1615	0.3073	0.0365	0.0625	0.0625	0.1615	0.151	1

Números entre paréntesis muestran la frecuencia absoluta; números debajo del paréntesis representan la frecuencia relativa; Po= *Pinus oaxacana*; Qcra= *Quercus crassifolia*; Qe= *Quercus elliptica* Née; Plei= *Pinus leiophylla*; Qlau= *Quercus laurina*; Ax= *Arbutus xalapensis*; Co= *Comarostaphylis* sp.; Ppa= *Pinus patula*; Qca= *Quercus castanea* Née; Aacu= *Alnus acuminata*; Qacu= *Quercus acutifolia* Née; Qsal= *Quercus salicifolia* Née; Poca= *Pinus oocarpa*; Qru= *Quercus rugosa*.

Los sitios arbolados en que se presentó la mayor frecuencia de especies fue la exposición noroeste con un total de 30% del total, seguida de la noreste y sureste las dos con un 16%, mientras que los sitios arbolados que presentaron la menor frecuencia de especies (3%) fueron los ubicados en exposición norte. Por otro lado, la especie que se encontró con mayor frecuencia de individuos fue *Pinus leiophylla* con un 14.06% del total, seguido de las especies *Quercus crassifolia* y *Alnus acuminata*, ambas con 11.46%. En contraste con la especie *Comarostaphylis*

sp. que se encontró en menor frecuencia con solo 1.56% (Cuadro 5). La presencia de especies es dependiente de la exposición del sitio (χ^2 , $p < 0.0001$).

DISCUSIÓN

En este estudio se probaron 11 modelos alométricos para estimar biomasa en cada componente del arbolado, en función de la altura sobre el nivel del mar (asnm) y la exposición en que se ubica el sitio, así como la pendiente del terreno. Mostraron coeficientes de ajuste (R^2 ajustado) de 0.84, 0.42 y 0.34 para fuste+corteza, ramas y follaje, respectivamente. Estos resultados son inferiores con los obtenidos por Montes de Oca-Cano *et al.* (2009) al ajustar ecuaciones lineales y no lineales para estimar biomasa en *Pinus duranguensis*. En las ramas, el R^2 ajustado encontrado es bajo al descrito por Méndez-González *et al.* (2011) al cuantificar la biomasa en *Pinus devoniana* Lindl., dando como resultado 0.60. En el follaje el R^2 resultante fue bajo, en comparación a 0.88 al que determinó Rodríguez-Ortiz (2010) al evaluar la biomasa de *Pinus patula*.

Los coeficientes de determinación de los modelos obtenidos para cada componente son relativamente bajos, debido a que se realizaron para un grupo de especies, a diferencia de los R^2 reportados por Díaz-Franco *et al.* (2007); Pimienta *et al.* (2007); Avendaño *et al.* (2009); Fonseca *et al.* (2009) y Flores-Nieves *et al.* (2011), donde realizaron la estimación para una sola especie, obteniendo modelos con valores de R^2 que van desde 0.91 a 0.99.

Por otro lado, Vidal *et al.* (2004) hacen referencia que los modelos con un R^2 mínimo de 0.70 se consideran buenos. Sin embargo, éstos no solo deben poseer R^2 altos o bajos, sino más bien, estimar lo razonable y confiable. De manera que lo anterior se debe tener presente al validar el modelo en campo. En particular, los modelos para biomasa, son aquellos que relacionan las variables de fácil medición en campo, como son el diámetro normal y la altura, como lo comprobaron Ayala-López *et al.* (2002); Figueroa-Navarro *et al.* (2005); Pacheco *et al.* (2007); Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2009); Jiménez (2010) y Chávez-Pascual *et al.* (2013). Todos al ensayar múltiples modelos alométricos, descubrieron que los mejores son los que incluyen esas variables. Por esta razón, en el presente estudio se utilizó altura y diámetro de los árboles para estimar biomasa aérea de los componentes.

De acuerdo con los análisis de varianza y prueba de Duncan para comparación de medias existe influencia de la altitud y exposición en solo algunos componentes aéreos sobre la productividad de biomasa. En relación a lo anterior Martínez-Salvador *et al.* (2013) hacen referencia que en territorios con homogeneidad en las variables es complicado encontrar diferencias significativas. No obstante en esta investigación se obtuvo que las masas arboladas ubicadas en sitios de mayor altitud acumularon más biomasa, en comparación a masas arboladas ubicadas en sitios de menor altitud (Alves *et al.*, 2010). Así como lo comprobaron Ming y Guo (2011), quienes estudiaron los efectos del gradiente altitudinal sobre la biomasa en regiones montañosas; donde determinaron que la mayor biomasa almacenada se encuentra en el rango de 2000 a 3900 m. Esto se atribuye a que corresponde a las partes altas de la cuenca y en esas zonas se tienen densidades bajas y por lo tanto mayor capacidad para almacenar biomasa (Valenzuela y Granados, 2009). En este caso se encontraron 256 árboles por hectárea, valor cercano al descrito por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) de 275. A diferencia de los 353 individuos por

hectárea que reportan Domínguez-Hernández *et al.* (2012) al realizar un análisis dasométrico de un bosque mixto en el estado de Puebla.

Por otro lado, las variables fisiográficas exposición y altitud determinan que especies se desarrollan en ellas (Sánchez-González y López-Mata, 2003). Por lo tanto, se manifiesta que la productividad en una exposición o altitud en particular está influenciada por el tipo de especie que contenga (Encina *et al.*, 2007; Reyes-Muñoz *et al.*, 2011). Esto porque, no todas las especies tienen las características físicas y genéticas que les permita almacenar mayor biomasa en sus dimensiones (Olvera-Vargas y Figueroa-Rangel, 2012).

CONCLUSIONES

Los modelos generados estiman confiablemente la biomasa del bosque mixto de encino-pino de Santa María Tlahuitoltepec, debido a que mostraron alta significancia, de acuerdo con los parámetros estadísticos obtenidos. El modelo que estima con mejor ajuste y alta confiabilidad la biomasa tallo+corteza y de ramas fue Schumacher-Hall. Todos ellos relacionan variables de fácil medición en campo, tales como el diámetro normal y la altura de árboles. Las ecuaciones alométricas generadas para un grupo de especies ayudan a optimizar tiempos y costos, por lo que facilitan una gestión forestal sostenible del bosque mixto. De acuerdo con las pruebas estadísticas realizadas, la exposición y altitud influyeron en varios de los componentes aéreos, encontrándose valores mayores en exposición sur 913.1 t ha^{-1} y altitudes de 2630 a 2900 m.

LITERATURA CITADA

- Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6(36): 725-736.
- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures y M. Díaz L. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27: 105-114.
- Aguirre-Calderón, O. A. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 73-84.
- Álvarez, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 89 p.
- Alves L.F., S. A. Vieira, M.A. Scaranello, P.B. Camargo, F.A.M Santos, C.A. Joly and L.A Martinelli. 2010. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest Brazil. *Forest Ecology and Management* 260: 1-13.
- Arreaga G., W. E. 2002. Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de la Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 111 p.
- Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233-238.

- Ayala-López, R. S., B. H. J. De Jong-Bergsma y H. Ramírez-Maldonado. 2002. Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 153-157.
- Benjamín O., J. A., y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.
- Cuenca, M.E., O. Jadán, K. Cueva y C. Aguirre. 2014. Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosques de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ*. 4(1): 21-31.
- Chávez-Pascual, E. Y., G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Carrillo-Rodríguez, J. R. Enríquez-del Valle, J. L. Chávez-Servia, G. V. Campos-Ángeles. 2013. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart) Andersen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.6: 1273-1284.
- Dávalos S., R., M. I. Rodrigues M., y E. M. Pinillos-Cueto. 2008. Almacenamiento de carbono. In: Manson, R. H., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina. y K. Mehlreter (eds.). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. Instituto de Ecología A. C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INE SEMARNAT). México. pp. 223-233.
- Delgado, L.A., M.F. Acevedo, H. Castellanos, H. Ramírez y J. Serrano. 2005. Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia* 30(5): 275-283.
- 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.
- Domínguez-Hernández, F., F. Huerta-Ortega, B. Barrios-Díaz y M.A. Posadas-García. 2012. Análisis dasométrico y propuesta de ordenación agroforestal del bosque en Tetela de Ocampo, Puebla. *Avances en Investigación Agropecuaria* 16(3): 75-82.
- Encina D., J.A., A. Zárate L., J. Valdés R. y J.A Villarreal Q. 2007. Caracterización ecológica y diversidad de los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 81: 51-63.
- Figuroa-Navarro, C., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez, y M. Acosta-Mireles. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 23(1): 57-64.
- Flores-Nieves, P., M. A. López-López, G. Ángeles-Pérez, M. de L. de la Isla-Serrano y G. Calva-Vásquez. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(8): 9-20.
- Fonseca G., W., F. Alice G y J. M. Rey B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1): 36-47.
- Griffiths, R.P., M.D. Madritch and A.K. Swanson. 2009. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management* 257(1):1-7.
- Jiménez C., C. del R. 2010. Usos de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 55 p.
- Martínez-Salvador, M., R. D. Valdez-Cepeda y M. Pompa-García. 2013. Influencia de las variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 19(3): 35-49.

- Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrete, M. A. 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 *P. Pseudostrobus* Lindl. en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4): 479-471.
- Ming Q. and S. Guo. 2011. High gradient effects of forest biomass energy in mountainous region a case of Meili snow mountain. *Procedia Earth and Planetary Science* 2: 315-320.
- Monroy R., C. y J. de J. Nívar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10(2): 29-43.
- Montes de Oca-Cano, E., P. García-Ramírez, J. A. Nájera-Luna y J. Méndez-González. 2009. Ajustes de ecuaciones de biomasa para *Pinus duranguensis* (Martínez M.) en la región de el Salto, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 65-71.
- Nívar-Cháidez, J.J. y S. González-Elizondo. 2009. Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica* 27: 71-87.
- Olvera-Vargas, M. y B.L. Figueroa-Rangel. 2012. Caracterización estructural de bosques montanos dominados por encino en el centro-occidente de México. *Ecosistemas* 21 (1-2): 74-84.
- Ordóñez D., J. A. B. 2008. Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias* 1(90): 37-42.
- Pacheco E., F. C., A. Aldrete, A. Gómez G., A. M. Fierros G., V. M. Cetina-Alcalá y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnica Mexicana* 30(3): 251-254.
- Pardo-Toledo., E., A. Araujo-Murakami, L. Arroyo P., J. P. Heredia, V. D. Rojas-Landivar, M. Flores-Valencia, Z. Pérez, R. Sibler, L. M. Mendizabal, M. Vega-Martínez y L. Moreno. 2014. Productividad interanual e interestacional de la biomasa aérea en la Chiquitanía transicional a la Amazonía (Guarayos, Bolivia). *Ecología en Bolivia* 49(2): 77-92.
- Pimienta de la T., D. de J., G. Domínguez C., O. Aguirre C., F. J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura forestal. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.*
- Reyes-Muñoz, J.L., O.A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, E.J. Treviño-Garza, E. Jurado, R.F. González-Laredo. 2011. Modelos de predicción del incremento en volumen para bosques mezclados del estado de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1): 103-113.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño- Garza y R. Razo Z. 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.
- Rodríguez-Ortiz, G. 2010. Efecto de aclareos en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Ixtlán, Oaxaca. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. 134 p.
- Rodríguez-Ortiz, G., V. A. González-Hernández, A. Aldrete, H. M. De los Santos-Posadas, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2011. Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnica Mexicana* 34(3): 205-212.

- Romahn, de la V. C. F. y H. Ramírez M. 2006. Dendrometría. Edición digital corregida y aumentada. Universidad Autónoma Chapingo. México. 309 p.
- Sánchez-González, A. y L. López-Mata. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica* 74(1): 47-71.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Schlegel, B., J. Gayoso y J. Guerra. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. Chile, Valdivia. 17 p.
- Silva-Arredondo, F. M. y J. de J. Návar-Cháidez. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(2): 155-160.
- Valenzuela N., L.M. y D. Granados S. 2009. Caracterización fisonómica y ordenación de la vegetación en el área de influencia de el Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 29-41.
- Vallejo, A., P. Rodríguez, C. Martínez, P. Hernández y B. de Jong. 2007. Guía para el diseño de proyectos MDL forestal y de bioenergía. CATIE, Turrialba, CR. 253 p.
- Vidal, A., J.Y. Benítez, J. Rodríguez, R. Carlos y H. Gra. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la E.F.I La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista de Ciencias Forestales* 11:60-66.
- Vilá, M., J.Vayreda, L. Comas, J.J. Ibáñez, T. Mata and B. Obón. 2007. "Species richness and wood production: a positive association in Mediterranean forests". *Ecology Letters* 10(3): 241-250.
- Yerena-Yamallel, J. I., J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón y E. J. Treviño-Garza. 2011. Concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 283-291.