

MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMAR BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN REGENERACIÓN NATURAL DE *Pinus oaxacana*

[ALLOMETRIC MODELS FOR ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS AND VOLUME IN
NATURAL REGENERATION OF *Pinus oaxacana*]

**Daniel Martínez-Santiago^{1§}, Prudencia Caballero-Cruz², Ithaiz Aparicio-Cuevas¹, Rigoberto
González-Cubas¹, Octavio Lemuel Cruz-Santiago¹**

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande. Km 1.2 carretera a Morelos, San Miguel el Grande, Tlaxiaco, Oaxaca. C.P. 71140. ²Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Linares-Cd. Victoria. Km 145. C.P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

[§]Autor para correspondencia: (daniel.ms@smiguelgde.tecnm.mx).

RESUMEN

Los bosques juegan un papel fundamental para minimizar los efectos del cambio climático, pues a través de la fotosíntesis fijan el de dióxido de carbono (CO₂), que es el gas de efecto invernadero de mayor concentración en la atmósfera emitido principalmente por actividades humanas. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar modelos de regresión para estimar biomasa aérea y volumen en regeneración natural de *Pinus oaxacana*. Para esto se apareon 61 renuevos entre brizales y latizales, los cuales fueron separados en tallo, ramas y hojas, y posteriormente sometidos a un proceso de deshidratación en estufa hasta alcanzar un peso constante (peso anhidro). El diámetro basal y altura total de cada árbol fueron variables empleadas para estimar biomasa total, por componentes y volumen de árboles individuales. Los resultados mostraron que el mejor modelo para estimar la biomasa en ramas ($R^2_{aj.} = 0.90$, RCME = 0.54) y hojas ($R^2_{aj.} = 0.83$, RCME = 0.62) fue $Y = \exp(\beta_0) db^{\beta_1}$, para biomasa total ($R^2_{aj.} = 0.97$, RCME = 0.25), biomasa en tallo ($R^2_{aj.} = 0.97$, RCME = 0.27) y volumen ($R^2_{aj.} = 0.84$, RCME = 0.74) fue $Y = \exp(\beta_0) db^{\beta_1} * h^{\beta_2}$. Las herramientas generadas en este estudio podrán ser aplicadas de manera directa en inventarios de biomasa-volumen y de manera indirecta para cuantificar la cantidad de carbono que almacenan estas comunidades forestales.

Palabras clave: Cambio climático, captura de carbono, ecuaciones alométricas, región Mixteca, renuevo.

ABSTRACT

Forests are important because they help minimize the effects of climate change, since through photosynthesis they fix carbon dioxide (CO₂), which is the greenhouse gas with the highest concentration in the atmosphere, emitted mainly by human activities. Therefore, the objective of the research was to evaluate regression models to estimate aerial biomass and volume in natural regeneration of *Pinus oaxacana*. For this purpose, 61 saplings and pole-sized were felled, which were sectioned into stems, branches and leaves, and subsequently subjected to an oven-dried dehydration process until a constant weight (anhydrous weight) was reached. The basal diameter and total height of each tree were variables used to estimate total biomass, by components and volume of individual trees. The results showed that the best model for estimating biomass in branches ($R^2_{aj.} = 0.84$, RCME = 0.54) and leaves ($R^2_{aj.} = 0.90$, RCME = 0.62) was $Y = \exp(\beta_0) db^{\beta_1}$, for total biomass ($R^2_{aj.} = 0.97$, RCME = 0.25), stem biomass ($R^2_{aj.} = 0.97$, RCME = 0.27) and volume ($R^2_{aj.} = 0.84$, RCME = 0.74) was $Y = \exp(\beta_0) db^{\beta_1} * h^{\beta_2}$. The information generated in this study can be applied directly to biomass-volume inventories and indirectly to quantify the amount of carbon stored in these forest communities.

Recibido: 28-abril-2021

Aceptado: 08-junio-2021

Keywords: Climate change, carbon sequestration, allometric equations, Mixteca region, saplings.

INTRODUCCIÓN

Los bosques juegan un papel importante por las diferentes funciones que desempeñan, entre ellas, el proceso de fotosíntesis, proceso mediante el cual fijan el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra suspendido en la atmósfera, siendo este gas el que más contribuye al cambio climático (Acosta-Mireles *et al.*, 2008), dicho gas es emitido principalmente por las actividades humanas. Una forma de mitigar los efectos del cambio climático es a través de los ecosistemas forestales como medios de almacenamiento de carbono (Flores *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2020). En ese contexto, las investigaciones relacionadas con la cuantificación de la biomasa forestal son importantes porque a través de estos se puede conocer la cantidad de carbono almacenado en los bosques (Correia *et al.*, 2010; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019; Sáenz *et al.*, 2021).

Una forma de evaluar la biomasa es mediante ecuaciones alométricas, estas estiman de forma precisa la biomasa total y por componentes. Para el desarrollo de estas ecuaciones se realizan muestreos destructivos de árboles con la finalidad de obtener la biomasa de manera directa, y con análisis de regresión se relaciona con variables dendrométricas como el diámetro normal y altura total, las cuales son fáciles de medir, y que comúnmente se obtienen en inventarios forestales (Méndez-González *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2016; Vásquez-Fabián *et al.*, 2017; Flores *et al.*, 2018; Montoya *et al.*, 2018).

Otro método empleado para estimación de la biomasa es a través del volumen (m^3) y la densidad básica del árbol (g cm^{-3}) (Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010; Zhang *et al.*, 2012; Pimienta-de la Torre *et al.*, 2019), el producto de estas dos variables y el factor de expansión genera el peso seco total del árbol (biomasa) (Schlegel, 2001).

Por otra parte, para mantener una producción sostenible de madera se debe contar con ecuaciones de volumen, que estimen información confiable sobre las existencias volumétricas de un rodal para su aprovechamiento (Vargas-Larreta *et al.*, 2017; Raptis *et al.*, 2020). Por lo general, estas ecuaciones emplean como variables predictoras el diámetro y altura total del árbol y las estimaciones suelen ser para volumen total y comercial de los árboles en pie (Ramos-Uvilla *et al.*, 2014; Ramírez-Martínez *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2020).

La especie en estudio es un taxón que se cultiva con fines maderables y para la obtención de resina, se distribuye en un intervalo altitudinal 1,500 a 3,200 m. Las alturas de estos árboles oscilan de 25 a 40 m, con diámetros hasta de 1 m. Esta especie se asocia con *Pinus maximinoi*, *P. rufa*, *P. pseudostrobus*, *P. patula* var. *longipedunculata*, *P. douglasiana*, *P. nubicola*, *P. ayacahuite* (Perry, 1991). Se distribuye en los estados de México, Puebla, Guerrero, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. También se encuentra en las tierras altas de Guatemala y en Honduras (Mirov, 1961). Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue ajustar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea y volumen en regeneración natural de *P. oaxacana* Mirov.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en San Miguel el Grande, ubicado al oeste del estado de Oaxaca en un bosque templado, donde se distribuye *P. oaxacana* de manera natural. La coordenada central del área de estudio es $97^{\circ}37'12''$ LO y $17^{\circ}02'47''$ LN (Figura 1). La cota altimétrica del área oscila de 2,200 a 3,330 m. El estudio se realizó en el área de distribución natural de *P. oaxacana* (Figura 1). Los tipos de climas predominantes en la comunidad son semifrío-subhúmedo Cb'(w2) y templado-subhúmedo C(c2), con lluvias en verano (García, 1998). Los suelos corresponden a los tipos regosoles, litosoles y vertisoles (INEGI, 2014). La vegetación está representada por bosques de pino y pino-encino (INEGI, 2016).

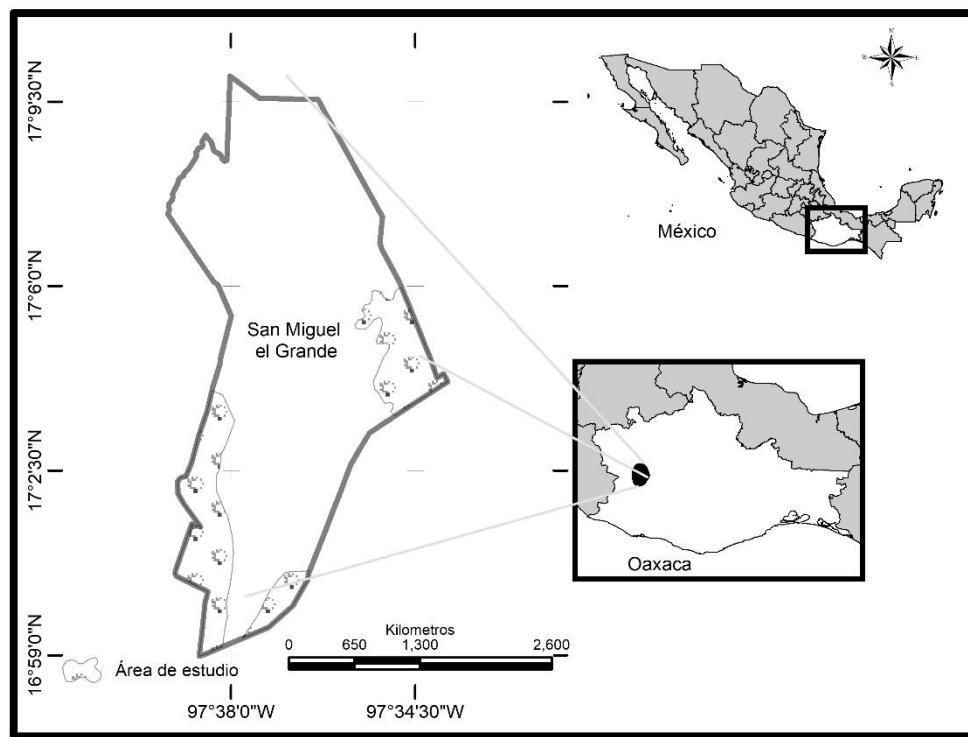


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Muestreo

El muestreo se realizó en el mes de mayo de 2021, en el área de distribución natural de la especie. La técnica de muestreo que se utilizó fue dirigida, en la cual, se seleccionaron 61 renuevos entre briznales y latizales. Se consideraron individuos libres de plagas, enfermedades y defectos físicos y/o mecánicos (Benavides *et al.*, 2021). Previo al derribo, a cada árbol se le midió a 5 cm del nivel del suelo el diámetro a la base (db, cm) con un calibrador digital Truper® y una vez apeado el árbol, se midió la longitud total (h, m) con una cinta métrica Keson®.

Determinación de biomasa y volumen

Los individuos fueron separados por componentes (tallo, hojas y ramas), de los cuales se obtuvo el peso fresco (g) en campo con el uso de básculas romanas marca Ohaus® con capacidades de 0.25 ± 0.01 , 0.5 ± 0.02 y 13 ± 0.5 kg. De cada componente se extrajo una submuestra del 10 al 20% de su peso, estas se introdujeron a un horno de secado marca Felisa® modelo Fe-291ad, a una temperatura de 75 °C hasta obtener un peso constante (Flores *et al.*, 2018). El peso anhídrico (g) de las submuestras se determinó en laboratorio con una báscula electrónica marca Ohaus® modelo Pa4202 con precisión de 0.01 g. La biomasa de cada componente se obtuvo mediante la expresión propuesta por Pearson *et al.* (2005).

$$Bc = \frac{Pss}{Pfs} \times pfm$$

Donde:

Bc = Biomasa por componente (g)

Pss = Peso seco de la submuestra (g)

Pfs = Peso fresco de la submuestra (g)

Pfm=Peso fresco de la muestra (g).

Para la determinación del volumen se consideró solo el tallo con corteza, este fue seccionado en longitudes de 0.5 m, las primeras secciones fueron cubicadas con la fórmula de Smalian y la sección final (punta) con la fórmula del cono (Romahn y Ramírez, 2010). El volumen total del tallo se obtuvo al sumar los volúmenes de las secciones. Debido a las dimensiones de los individuos el volumen fue calculado en decímetros cúbicos (dm³).

$$V_s = \left(\frac{S_0 + S_1}{2} \right) \times L \quad \text{Smalian}$$

$$V_c = \left(\frac{S_0 L}{3} \right) \quad \text{Cono}$$

$$S_0, S_1 = 0.7854 \times d^2$$

Donde:

V = volumen (dm³)

L = longitud de la sección (dm)

d = diámetro basal (dm)

S₀ y S₁ = áreas de las secciones transversales (dm²).

Ajuste de modelos alométricos

Se ajustaron tres modelos propuestos por Picard *et al.* (2012), los cuales fueron utilizados por Montoya *et al.* (2018) para estimar biomasa y volumen de *Pinus halepensis* Mill., en el norte de México.

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(db) + \varepsilon \quad (1)$$

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(db^2 h) + \varepsilon \quad (2)$$

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(db) + \beta_2 \ln(h) + \varepsilon \quad (3)$$

Donde:

y = biomasa por componentes y total (g), y volumen (dm³)

db = diámetro a la base (cm)

h = altura total (m)

ln = logaritmo natural

β_0 , β_1 , β_2 = parámetros estadísticos.

ε = error.

El ajuste de ecuaciones se realizó en el software STATISTICA 10 (StatSoft Inc., 2011), para ello se utilizó el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) a través de regresión lineal. La calidad de ajuste de los modelos se evaluó mediante el valor del coeficiente de determinación ($R^2_{aj.}$), raíz del error medio cuadrático (REMC), probabilidad del modelo y el criterio de información de Akaike (AIC) (Flores *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2020; Medrano-Meraz *et al.*, 2021).

Comúnmente los modelos de biomasa y volumen presentan heteroscedasticidad, es decir, la variabilidad de la biomasa o volumen es mucho mayor entre más grandes sean las dimensiones de los individuos, en este sentido resulta útil emplear la transformación logarítmica de los modelos para corregir este problema (Picard *et al.*, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadísticas descriptivas de las variables

En el cuadro 1 se presenta el rango de valores empleados en el ajuste de ecuaciones de biomasa y volumen. De acuerdo con Monroy y Navar (2004), las estimaciones tendrán mayor precisión cuando se aplican en árboles con dimensiones reportadas.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables.

Variables	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Estándar
Diámetro basal (cm)	4.4	9.00	0.50	2.35
Altura total (m)	1.9	3.67	0.30	0.97
Biomasa en ramas (g)	241.3	1129.27	0.15	293.95
Biomasa en hojas (g)	216.0	899.09	2.65	227.63
Biomasa en tallo (g)	606.9	2857.10	2.04	738.99
Biomasa total (g)	1064.2	4067.68	4.84	1210.33
Volumen (dm ³)	1.5	7.02	0.003	1.761

Ecuaciones de biomasa y volumen

Las tres ecuaciones ensayadas presentaron buena calidad de ajuste, sin embargo, con base a los criterios para la selección del mejor modelo, las ecuaciones 1 y 3 resultaron optimas con valores altos en R^2_{aj} , modelos estadísticamente significativos ($p < 0.0001$) y valores bajos en RCME y AIC.

En estimaciones de biomasa en hojas y ramas el diámetro basal explicó el 83 y 0.90% de la variabilidad de la biomasa de estos componentes, asimismo, esta variable junto con la altura total explicaron el 97 % de la variabilidad de biomasa en tallo y total, y un 84% para el volumen (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar biomasa y volumen en *Pinus oaxacana*.

Ecuación	R^2_{aj}	RCME	Prob > F	AIC
$\ln(Bh)=2.340052+1.823094 \ln(db)$	0.83	0.54	<0.0001	-72.70
$\ln(Br)=0.777475+2.770005 \ln(db)$	0.90	0.62	<0.0001	-56.07
$\ln(Bt)=3.09463+1.248865 \ln(db)+1.424764 \ln(h)$	0.97	0.27	<0.0001	-152.83
$\ln(Btotal)=3.643054+1.556009 \ln(db)+0.891928 \ln(h)$	0.97	0.25	<0.0001	-161.87
$\ln(V)=-2.95024+1.30361 \ln(db)+1.323503 \ln(h)$	0.84	0.74	<0.0001	-33.75

Bh=biomasa en hojas (g), Br=biomasa en ramas (g), Bt=biomasa en tallo (g), Btotal=biomasa total (g), V=volumen (dm³), db=diámetro a la base (cm), h=altura total (m), ln=logaritmo natural, AIC = criterio de información de Akaike.

La calidad de ajuste de las ecuaciones aquí presentadas es similar a lo reportado por diferentes investigadores en estudios de biomasa y volumen, en este contexto, Flores *et al.* (2018) ajustaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa en regeneración natural de cuatro especies forestales en el norte de México, los ajustes altos fueron para estimaciones de biomasa en fuste y total, y más bajos para hojas y ramas. El mismo comportamiento en la calidad de ajuste de los modelos lo reportan Rodríguez-Ortiz *et al.* (2019) en estimaciones de biomasa para *Pinus patula* en la Sierra Norte de Oaxaca y Montoya *et al.* (2018) en estimación de biomasa y volumen para *Pinus halepensis* Mill. en sierra de Zapalinamé, Coahuila. En estudios de biomasa y volumen, normalmente los ajustes bajos se observan cuando existe alta

heterogeneidad en los datos observados, en ajustes altos los datos suelen ser más homogéneos (Méndez-González *et al.*, 2011; Manzano *et al.*, 2016).

Un procedimiento utilizado para incrementar la precisión en las estimaciones de biomasa es a través del método de estimación simultánea SUR (Seemingly Unrelated Regressions o regresiones aparentemente no relacionadas). Con este método es posible reducir el error estándar de los parámetros (β_i) y mejorar las estimaciones en contraste al método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) (Monroy y Navar, 2004; Boca *et al.*, 2017).

El diámetro por sí solo o asociado con la altura del árbol han sido las variables que estiman de manera significativa la biomasa y volumen de árboles individuales, en este sentido, Manzano *et al.* (2016) y Carrillo *et al.* (2016) ajustaron el modelo potencial, donde el diámetro explicó de un 96 a un 99 % de la variación de la biomasa aérea respectivamente. Sin embargo, cuando al modelo se le incluye la altura total y la densidad básica de la madera se mejora la capacidad predictiva de la ecuación (Cortés-Sánchez *et al.*, 2019).

Distribución de biomasa

En promedio, en el tallo se acumuló un 52% de la biomasa total aérea, seguido de los componentes de hojas con un 28% y ramas en un 19%. Normalmente la disposición de biomasa en coníferas, el mayor porcentaje corresponde al tallo, seguido de hojas o ramas, esto ocurre cuando se evalúa solamente biomasa aérea (Avendaño *et al.*, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Carrillo *et al.*, 2016; Chávez-Aguilar *et al.*, 2016). Por otra parte, cuando se evalúa biomasa subterránea, las raíces de coníferas aportan porcentajes significativos de biomasa, con valores que oscilan entre 12.1–22% respecto a la biomasa total del árbol (Montero *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2016; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019; Medrano-Meraz *et al.*, 2021).

Es posible que la disposición de biomasa en los árboles cambie a través del tiempo. Se ha demostrado que a mayor edad se presenta un incremento en los porcentajes de biomasa en tallo y ramas, y un decremento en la biomasa en hojas (Monroy y Navar, 2004; Montes de Oca-Cano *et al.*, 2012; Boca *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

Las ecuaciones generadas para estimar biomasa por componentes y total, así como el volumen, presentaron buena calidad de ajuste con base a sus valores estadísticos, por lo tanto, estas ecuaciones podrán ser empleadas en inventarios de biomasa y volumen en regeneración natural de *P. oaxacana*. De los tres componentes evaluados, el tallo es el componente que concentra más del 50% de la biomasa total aérea. Para estudios de cuantificación de carbono, se sugiere evaluar el componte subterráneo a través de métodos directos o indirectos.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para la realización del presente proyecto con Clave: 10355.21-PD.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures y M. Díaz-Lavariega. 2008. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27(2): 105-114.
- 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*. *Fitotec. Mex.* 32(3): 233-238. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.3.233>.

- Benavides, S.J. de D., O. Torres G., J.G. Flores G., M. Acosta M. y A. Rueda S. 2021. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65): 90-111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.791>.
- Boca, T., H. Fassola, E. Crechi, S. Barth, A. Keller, R. Winch y P. Ferrere. 2017. Modelos aditivos de predicción de biomasa aérea de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de Misiones Argentina. *Quebracho* 25(1,2): 5-15.
- Carrillo, A.F., M. Acosta M., C. del R. Jiménez C., L. González M. y J.D. Etchevers B. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3): 681-691. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.327>.
- Chávez-Aguilar, G., G. Ángeles-Pérez, M. Pérez-Suárez, M.A. López-López, E. García-Moya y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22(3): 23-36. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>.
- Correia, A.C., M. Tomé, C.A. Pacheco, S. Faias, A C. Dias, J. Freire, P.O. Carvalho y J.S. Pereira. 2010. Biomass allometry and carbon factors for a Mediterranean pine (*Pinus pinea* L.) in Portugal. *Forest Systemsm* 19(3): 418-433. <https://doi.org/10.5424/fs/2010193-9082>.
- Cortés-Sánchez, B.G., G. Ángeles-Pérez, H.M. de los Santos-Posadas y H. Ramírez-Maldonado. 2019. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques* 25(2): 1-17. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521799>.
- Figueroa-Navarro, C.M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez y H.M. de los Santos-Posadas. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. Et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 1-8. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658>.
- Flores, M.F., D.J. Vega-Nieva, J.J. Corral-Rivas, J.G. Álvarez-González, A.D. Ruíz-González, C.A. López-Sánchez y P.A. Carrillo. 2018. Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(46): 158-185. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.119>.
- Flores, R.N.F., L. Mendizábal H. y J. Alba L. 2012. Potencial de captura y almacenamiento de CO_2 en el Valle de Perote. Estudio de caso: *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis* D.K. Bailey. *Forestal Veracruzana* 14(1): 17-22.
- García, E. 1998. Climas escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Consultado: 12 de octubre del 2021.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI). 2014. Conjunto de datos vectoriales edafológico. Escala 1:1000000. Serie II. México, D.F., México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (12 de octubre del 2021).
- Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI). 2016. Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (12 de octubre del 2021).
- Manzano, M.F., J.I. Valdez H., M.A. López L. y E. Pineda H. 2016. Biomasa aérea de *Zanthoxylum kellermanii* P. Wilson en una selva perennifolia del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7 (33): 40-51. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i33.89>.
- Martínez, L.J.E., F. Carrillo A., M. Acosta M., M.E. Romero S. y R. Pérez M. 2020. Ecuaciones alométricas para estimar carbono en briznalez de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60): 145-160. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.726>
- Martínez, S.D., S. Solís G., F.J. Hernández y J. de J. Graciano L. 2016. Ecuaciones para estimar biomasa aérea y subterránea en áreas reforestadas de *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Forestal Veracruzana* 18(1): 25-32.

- Medrano-Meraz, F., M.A. López-López, G. Ángeles-Pérez, F. Cruz-Cobos y B.H. Jozeph-de Jong. 2021. Allometric equations for belowground biomass and carbon content of *Pinus patula* schl. et cham. *Rev. Fitotec. Mex.* 44 (3): 343-454.
- 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: 479-491.
- Mirov, N.T. 1961. Composition of gum turpentines of pines. *Forest Service U. S. Dept. of Agriculture. Washington* 25, D. C. Technical Bulletin No. 1239. 158 p. <https://doi.org/10.1002/jps.2600510124>.
- Monroy, R.C. y J. de J. Návar Ch. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* (10)2: 29-43. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1021273>.
- Montero, G., R. Ruiz-Peinado y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España.* 270 p.
- Montes de Oca-Cano, E., M Rojas-Ascensión, P. García-Ramírez, J.A. Nájera-Luna, J. Méndez-González, J. de 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. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a01>.
- Montoya, J.J.C., J. Méndez G., L. Sosa D., C.G. Ruíz G., A. Zermeño G., J.A. Nájera L., M.G. Manzano C. y A.S. Velázquez R. 2018. Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halapensis* Mill. En: *Coahuila, México. Madera y Bosques* 24 (especial): 1-11. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401880>.
- Pearson, T., S. Walker and S. Brown. 2005. *Sourcebook for land use. Land-Use Change and Forestry Projects. World Bank. Washington, D.C.* 57 p. <http://hdl.handle.net/10986/16491>.
- Perry, J.P.Jr. 1991. *The pines of Mexico and Central America. Timber Press Inc. Portland, OR, USA.* 231 p.
- 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. *Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*. 223 p.
- Pimienta-de la Torre, D. de J., J. Reyes-Reyes, J.A. Rodríguez-Morales y P. Marroquín-Morales. 2019. Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus Maximinoi* H.E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 23(2): 31-41.
- Ramírez-Martínez, A., W. Santiago-García, G. Quiñonez-Barraza, F. Ruiz-Aquino y P. Antúnez. 2018. Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehnen. *Madera y Bosques* 24(2): 1-15. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421496>.
- Ramos-Uvilla, J.A., J.J. García-Magaña, J. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, J.C. Velarde-Ramírez, H. J. Muñoz-Flores y G.G. García-Espinoza. 2014. Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(23): 93-109. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i23.344>.
- Raptis, D.I., V. Kazana, A. Kazaklis, and C. Stamatou. 2020. Development and testing of volume models for *Pinus nigra* Arn., *Fagus sylvatica* L. and *Quercus pubescens* Willd. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 82(4): 331-341. <https://doi.org/10.2989/20702620.2020.1733768>.
- Rodríguez-Ortiz, G., J.A. García-Aguilar, J.C. Leyva-López, C. Ruiz-Díaz, J.R. Enríquez- del Valle y W. Santiago-García. 2019. Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques* 25(1): 1-11. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Romahn, de la V., C.F. y H. Ramírez M. 2010. Dendrometría. *División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México.* 294 p.
- Sáenz R., J.T., A. Rueda S., J. de D. Benavides S., H.J. Muñoz F., D. Castillo Q. y J.E. Sáenz C. 2021. Ecuaciones alométricas, biomasa y carbono en plantaciones forestales en la costa de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65): 27-44. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.856>.

- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. pp. 2-13.
- Silva-Arredondo, F.M., y J.J. Návar-Cháidez. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 1(1): 56-62. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.653>.
- Statsoft Inc., 2011. Statistica (data analysis software system). Versión 10.
- Torres A, D., H.M. de los Santos P., A. Velázquez A. y J.C. Tamarit U. 2020. Ahusamiento y volumen comercial de tres procedencias de pinos tropicales en plantaciones forestales de Veracruz, México. Madera y Bosques 26(3): 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631890>
- Vargas-Larreta, B., J.J. Corral-Rivas, O. Aguirre-Calderón, J.O. López-Martínez, H.M. de los Santos-Posadas, F.J. Zamudio-Sánchez, E.J. Treviño-Garza, M. Martínez-Salvador y C.G. Aguirre-Calderón. 2017. Forest biometric system for forest management in Mexico. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 23(3): 437-455. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>.
- Vásquez-Fabián, S.A., G. Rodríguez-Ortiz, J.R. Enríquez-del Valle, G.V. Campos-Angeles y A. Santana-Flores. 2017. Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. Revista Mexicana de Agroecosistemas 4(2): 164-172.
- Zhang, L., X. Deng1, X. Lei, W. Xiang, C. Peng, P. Lei, y W. Yan. 2012. Determining stem biomass of *Pinus massoniana* L. through variations in basic density. Forestry 85: 601-609. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps069>.