



DOI: 10.29298/rmcf.v17i97.1667

Artículo de investigación

Fertilidad del suelo y crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en dos plantaciones forestales comerciales

Soil fertility and growth of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in two commercial forest plantations

René García Martínez^{1*}, Maricruz Tenorio Calixto¹, Juan Carlos Montoya Jiménez¹, Luis Alberto León Bañuelos², Marlín Pérez Suárez³

Fecha de recepción/Reception date: 30 de marzo de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de agosto de 2026.

¹Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores Valle de Bravo, División de Ingeniería Forestal. México.

²Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores Valle de Bravo, División de Ingeniería en Sistemas Computacionales. México.

³Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). México.

*Autor para correspondencia; correo-e: rene.gm@vbravo.tecnm.mx

*Corresponding author; e-mail: rene.gm@vbravo.tecnm.mx

Resumen

La productividad de las plantaciones forestales comerciales depende en gran medida de la fertilidad del suelo y la densidad arbórea. El objetivo de esta investigación fue comparar las características edáficas y su influencia en el desarrollo del arbolado, además de generar modelos altura-diámetro específicos en dos plantaciones de 18 años de *Pinus patula*. De cada ejemplar se midieron el diámetro normal y la altura, y se calcularon el área basal, la biomasa y el carbono arbóreo. Para caracterizar la fertilidad del suelo se determinaron las propiedades químicas en el perfil 0-30 cm. Finalmente, se ajustaron 14 modelos altura-diámetro. Los árboles de la Plantación A fueron superiores en altura y los de la Plantación B en diámetro, área basal y carbono por árbol, aunque a nivel de superficie, el almacén de carbono aéreo fue similar (75.6 Mg ha⁻¹ en A y 73.7 Mg ha⁻¹ en B). El suelo de la Plantación B registró altos niveles de *MOS*, *N*, *Ca*, *Mg* y *CIC*, lo que se reflejó en un mayor almacén de *COS*. Los modelos altura-diámetro resultaron con coeficientes de determinación bajos ($R^2=0.25-0.34$); el modelo MT1 presentó el mejor ajuste global y residuales con distribución normal. En conclusión, la fertilidad del suelo y densidad de plantación determinaron la productividad y almacenamiento de carbono. Sin embargo, en la modelación altura-diámetro aún es necesario incorporar variables adicionales para mejorar su capacidad predictiva a escala local.

Palabras clave: Almacén de carbono, captura de carbono, densidad arbórea, fertilidad edáfica, modelación alométrica, suelos forestales.

Abstract

The productivity of commercial forest plantations largely depends on soil fertility and stand density. The objective of this study was to compare soil properties and their influence on tree growth, as well as to develop site-specific height-diameter models for two 18-year-old *Pinus patula* plantations. The tree variables that were measured included diameter at breast height and total height, and the basal area, tree biomass and tree carbon stock were calculated. Soil fertility was characterized through chemical analyses of the 0-30 cm soil layer. Fourteen height-diameter models were fitted. Trees in Plantation A reached greater height, whereas those in Plantation B exhibited larger diameter, basal area, and carbon stock per tree. However, aboveground carbon stocks at the stand level were similar (75.6 Mg ha⁻¹ in A and 73.7 Mg ha⁻¹ in B). Soil in Plantation B contained higher levels of *SOM*, *N*, *Ca*, *Mg*, and greater *CEC*, which was reflected in higher *SOC* storage. The height-diameter models showed relatively low coefficients of determination ($R^2=0.25-0.34$); however, model MT1 achieved the best overall fit and normally distributed residuals. In conclusion, soil fertility and stand density were key factors determining productivity and carbon storage. Nevertheless, additional variables should be incorporated into height-diameter modeling to improve their predictive accuracy at the local scale.

Keywords: Carbon stock, carbon capture, tree density, soil fertility, allometric modeling, forest soils.

Introducción

Las plantaciones forestales comerciales (PFC) se han convertido en una estrategia importante para satisfacer la creciente demanda de madera y otros productos forestales y contribuir a reducir la presión sobre los bosques naturales (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2015; García-Cuevas et al., 2022; Muñoz-Flores et al., 2021) y mitigar los efectos del cambio climático mediante el establecimiento de especies nativas o introducidas de rápido crecimiento (García-Cuevas et al., 2022; Muñoz-Flores et al., 2021). Sin embargo, la productividad de estos sistemas depende de la calidad del sitio, que está relacionado con factores climáticos, edáficos (García-Martínez et al., 2024) y de manejo silvícola. Particularmente, las propiedades físicas y químicas del suelo desempeñan un papel fundamental, ya que podrían influir directamente en la disponibilidad de nutrientes, la retención de humedad y la actividad biológica del suelo; elementos que condicionan el desarrollo de la vegetación

(Lal, 2004; Weil & Brady, 2017). Por ejemplo, en bosques de *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus engelmannii* Carrière, la profundidad del suelo >43 cm, definió una mejor calidad de sitio (Martínez-Salvador et al., 2013).

Diversos estudios han demostrado que las diferencias en la fertilidad del suelo pueden traducirse en variaciones significativas en el crecimiento del arbolado incluso bajo condiciones climáticas similares. En plantaciones de *Tectona grandis* L. f. establecidas bajo condiciones hidroclimáticas comparables, el crecimiento de los árboles se relacionó directamente con la calidad del suelo (Salcedo-Pérez et al., 2019). De manera similar, investigaciones en *Pinus cooperi* C. E. Blanco han mostrado que los árboles establecidos en sitios con mejores condiciones edáficas (nutrientes y humedad) presentaron mayores tasas de crecimiento radial (82.5 % de proporción de madera tardía), con anillos de crecimiento más amplios (Pompa-García & Domínguez-Calleros, 2015).

Por otro lado, la densidad forestal influye en la dinámica de crecimiento del arbolado. En un estudio previo realizado por Qiao et al. (2024), en plantaciones de álamo (*Populus tomentosa* Carrière), concluyeron que las densidades bajas y medias favorecieron el crecimiento del árbol y los niveles altos de nutrientes en el suelo.

En México, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. es una de las especies subtropicales más utilizadas en programas de reforestación y en PFC por su rápido crecimiento y la calidad de su madera (Aparicio-Rentería et al., 2014). Sin embargo, en el centro del país, la supervivencia en las plantaciones apenas alcanza 44 % para esta especie (Torres-Rojo, 2021). Por ello, es necesario contar con información confiable sobre la calidad de las áreas forestales donde se establecen PFC, en especial con especies de rápido crecimiento como la de interés porque existe una fuerte relación de las variables ambientales con los rendimientos (García-Aguilar et al., 2017).

Otro aspecto clave es la generación de herramientas biométricas que permitan describir con precisión el crecimiento de los árboles y estimar variables estructurales relevantes para la planificación silvícola. Entre ellas, los modelos altura-diámetro constituyen un componente fundamental en los inventarios forestales, porque permiten estimar la altura del arbolado a partir del diámetro normal mediante

modelos alométricos, y optimizar los procesos de medición en campo (Santiago-García et al., 2017). Aunque son importantes, la precisión de las ecuaciones puede variar y depende de las condiciones del sitio y de la estructura del rodal, por lo que es necesario desarrollar modelos específicos para cada región y especie plantada. Por ejemplo, Monárrez-González et al. (2024) desarrollaron ecuaciones que proporcionan estimaciones confiables y precisas para determinar el volumen fustal y volumen total árbol de las especies *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. hartwegii* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. patula*, *P. pseudostrobus* Lindl., *P. teocote* Schied. ex Schltdl. & Cham., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. y *Quercus* sp. en bosques templados de Puebla, México.

Aunque existen numerosos estudios sobre fertilidad del suelo, productividad y modelación altura-diámetro en especies forestales, son escasos los trabajos que integran simultáneamente la caracterización edáfica, el crecimiento del arbolado y la evaluación de modelos biométricos en plantaciones comerciales de *P. patula* establecidas bajo condiciones del centro de México. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue comparar las características del suelo y su relación con el crecimiento del arbolado, así como ajustar modelos altura-diámetro para dos plantaciones forestales comerciales de *P. patula* establecidas en Villa de Allende, Estado de México, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en dos plantaciones forestales comerciales de *P. patula* establecidas en San Jerónimo Totoltepec, Villa de Allende, Estado de México, México. El clima predominante es templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 18.8 °C y precipitación de 1 000 mm anuales (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2008). El suelo es tipo Andosol (INEGI, 1978) derivado de ceniza volcánica (Meza-Pérez & Geissert-Kientz, 2006). Las plantaciones forestales comerciales se localizan en las siguientes coordenadas: Plantación A (19°20'40" N y 100°12'05" O) y Plantación B (19°20'59" N y 100°11'53" O) (Figura 1). La altitud promedio en la zona es de 2 470 m.

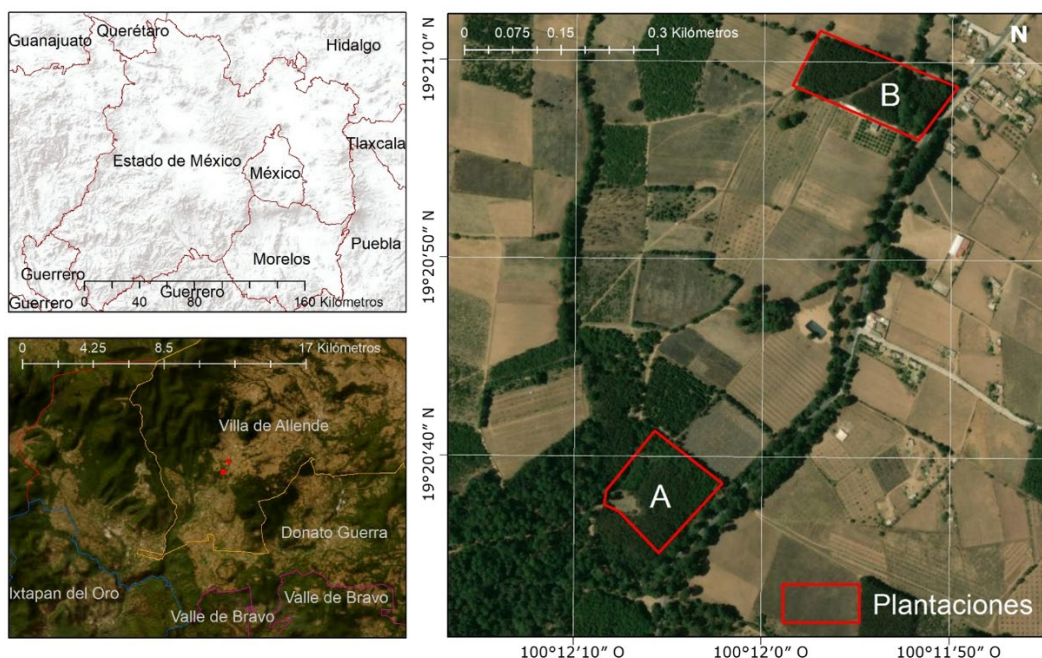


Figura 1. Geolocalización de las plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en Villa de Allende, Estado de México, México.

En 2024, cuando se obtuvieron los datos de campo, las plantaciones tenían 18 años. La plantación A es de 1 ha y 1 100 árboles ha⁻¹. La plantación B es de 1.6 ha y 703 árboles ha⁻¹.

Medición del arbolado

En cada plantación se establecieron aleatoriamente 10 sitios de forma circular de 450 m² (radio=12 m) para medir las características de todos los árboles vivos y sin daño estructural. El diámetro normal (cm) se midió a una altura de 1.3 m, con forcípula *Haglöf*® Mantax Blue y la altura total con un hipsómetro *Haglöf*® Vertex Laser Geo de acuerdo con los procedimientos descritos por West (2015). A partir de los datos de diámetro se calculó el área basal (cm²).

La biomasa total se calculó con la siguiente ecuación alométrica (Castellanos et al., 1996):

$$Biomasa(kg) = \exp(-1.8621) \times DN^{2.27675} \quad (1)$$

Donde:

DN = Diámetro normal (cm)

El almacén de carbono por árbol se calculó mediante un factor de conversión de 0.50 para convertir la biomasa en equivalentes de carbono (Petersson et al., 2012).

Análisis químico de suelo

En cada plantación se tomaron 10 muestras de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm. La extracción se realizó con una barrena de acero inoxidable (*SPECTRUM*® HA 6510) de 2 cm de diámetro (Acosta-Mireles *et al.*, 2009). Las muestras se colocaron en bolsas de plástico y se transportaron al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, para su análisis.

El *pH* se midió en una suspensión agua-suelo, relación 2:1 (Weil & Brady, 2017), con un potenciómetro portátil *Hanna*® modelo GroLine Combo. La materia orgánica del suelo (*MOS*) y carbono orgánico del suelo (*COS*) se cuantificaron con el método de *Walkley-Black* (Sleutel *et al.*, 2007). El nitrógeno (*N*) se determinó con la técnica de semimicro-*Kjeldahl* (Sáez-Plaza *et al.*, 2013) y el fósforo (*P*) con el método de *Olsen* (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021). Los cationes intercambiables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{1+}) se extrajeron con acetato de amonio (*J. T. Baker*®, México) (Havlin *et al.*, 2017) y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de absorción atómica (*Varian*® SpectrAA 220). La interpretación de los datos se realizó tomando como referencia la información publicada en la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2002) y datos publicados en distintos documentos (Binkley & Fisher, 2013; Havlin *et al.*, 2017; Osman, 2013; Porta-Casanellas *et al.*, 2019; Weil & Brady, 2017).

La densidad aparente de la profundidad de 0 a 30 cm del suelo se determinó relacionando la masa del suelo seco (secado en un horno *ICB*® 18 L, a 105 °C por 24 horas) y el volumen de la barrena con que se extrajo la muestra (Osman, 2013). La densidad aparente de la Plantación A fue 1.0 Mg m⁻³ y de la Plantación B fue 1.1 Mg m⁻³. Esta información se utilizó para calcular el almacén de C en el suelo a partir de la siguiente fórmula (Acosta-Mireles *et al.*, 2009):

$$\text{Carbono (Mg ha}^{-1}\text{)} = A \times PS \times DA \times \frac{COS}{100} \quad (2)$$

Donde:

A = Área del terreno (10 000 m²)

PS = Profundidad de muestreo (0.3 m)

DA = Densidad aparente del suelo

COS = Concentración de carbono orgánico en el suelo (%)

Análisis de datos del suelo y el arbolado

Las diferencias entre las plantaciones para las variables del arbolado (altura, diámetro, área basal y carbono) y del suelo (MOS , N , P , K , Ca , Mg , Na , pH , conductividad eléctrica [CE] y almacén de C) se evaluaron mediante una prueba t de *Student* para muestras independientes con corrección de *Welch* (Uramoto et al., 2025). El proceso se realizó en el software *R*, versión 4.5.2 (R Core Team, 2025).

Modelos altura-diámetro

Para estimar la altura a partir del diámetro a nivel de sitio específico, se ajustaron 13 modelos no lineales y un modelo cuadrático, los cuales son ampliamente utilizados en estudios sobre relaciones alométricas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Funciones para modelar la altura total a partir de diámetro normal de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Modelo	Ecuación	Referencia
MC	$h = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 d}]^{\beta_2}$	Clutter et al. (1983)
MT1	$h = \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 d^{\beta_2}}]$	Temesgen et al. (2014)
MT2	$h = e^{\left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{d + \beta_2}\right)}$	
MC1	$h = \beta_0 e^{(-\beta_1 d^{-\beta_2})}$	Castillo-Gallegos et al. (2018)
MC2	$h = \frac{d^{\beta_0}}{\beta_1 + \beta_2 d^{\beta_0}}$	
MC3	$h = \frac{\beta_0 d}{\beta_1 + d}$	
MC4	$h = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1^{-1} d^{-\beta_2}}$	
MC5	$h = \beta_0 \left(1 + \frac{1}{d}\right)^{-\beta_1}$	
MC6	$h = \beta_0 \left(-\ln\left(\frac{1}{d}\right)\right)^{\beta_1}$	
MC7	$h = \left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{d}\right)^{-\beta_2}$	
MS	$h = \beta_0 d^{(\beta_1 + \beta_2 d)}$	Sharma (2009)
MG1	$h = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2$	García-Cuevas et al. (2017)
MG2	$h = \beta_0 e^{\beta_1 \left(\frac{1}{d}\right)}$	
MG3	$h = e^{\beta_0 + \beta_1 \ln(d)}$	

h = Altura total; d = Diámetro normal; β_i = Parámetros del modelo. Cuadro modificado de Guerra-De la Cruz et al. (2019).

Para la Plantación A se utilizaron datos de 113 árboles y de 86 árboles para la Plantación B. Los modelos se tomaron del estudio de Guerra-De la Cruz et al. (2019) y se ajustaron a través del software *R* (R Core Team, 2025) utilizando la librería *gsnl* (Chau, 2025).

Para evaluar y comparar la bondad de ajuste de los modelos no lineales y el cuadrático se examinaron seis criterios estadísticos:

- (1) Suma de cuadrados del error (*SCE*)
- (2) Cuadrado medio del error (*CME*)
- (3) Raíz del cuadrado medio del error (*RCME*)
- (4) Coeficiente de determinación (R^2)
- (5) Criterio de información de *Akaike* corregido (*AICc*)
- (6) Criterio de información Bayesiano (*BIC*)

Finalmente, a cada uno de los criterios estadísticos se les asignó una calificación del 1 al 14 (1=Mejor ajuste y 14=Peor ajuste) las calificaciones obtenidas en los criterios se sumaron para cada uno de los modelos y se obtuvo una calificación final (CF), el modelo con menor puntuación en la calificación final representó el mejor ajuste.

Resultados y Discusión

Características del suelo

El almacén de *COS* (Mg ha^{-1}) mostró diferencia ($p < 0.05$) entre las plantaciones. Los promedios fueron de 92.2 ± 8.5 y 124.4 ± 10.8 para la Plantación A y B, respectivamente.

La cantidad de *C* que se incorpora al suelo depende de los flujos de carbono en el ecosistema, particularmente la incorporación del carbono proveniente de la hojarasca (Liao et al., 2010). En plantaciones de diferentes especies forestales del centro de México, el *COS* varió de 85.8 a 118.8 Mg ha^{-1} (García-Martínez et al., 2024). En bosques templados de Durango, México, hay en promedio 112.2 Mg ha^{-1} (Vargas-Larreta et al., 2023). Mientras que en bosques de *Abies religiosa* del Estado de México

bajo aprovechamiento, el almacén de COS fue de 129.1 Mg ha⁻¹ (Martínez-Campos et al., 2025) y en bosques de pino-encino en la Reserva de la Mariposa Monarca en el Estado de México es de 103 Mg ha⁻¹ (Pérez-Ramírez et al., 2013).

Las propiedades químicas fueron diferentes entre las plantaciones (Cuadro 2). La fertilidad del suelo en la Plantación B se caracterizó por mayor contenido de *MOS*, *N*, *Ca* y *Mg*. Estas variables son determinantes para el crecimiento y productividad en ecosistemas forestales, ya que la *MOS* regula la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de retención de humedad y la actividad microbiana del suelo (Lal, 2004; Six et al., 2002).

Cuadro 2. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en dos plantaciones forestales comerciales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., localizadas en Villa de Allende, Estado de México, México.

Variable	Plantación A	Diagnóstico	Plantación B	Diagnóstico
<i>MOS</i> (%)	5.3±0.7 b	Bajo	6.5±0.9 a	Medio
<i>N</i> (%)	19±3.8 b	Bajo	22±4.4 a	Medio
<i>P</i> (ppm)	8.0±2.4 a	Medio	5.5±1.7 b	Medio
<i>K</i> (meq 100g ⁻¹)	0.40±0.08 a	Medio	0.4±0.07 a	Medio
<i>Ca</i> (meq 100g ⁻¹)	3.9±0.6 b	Bajo	4.7±0.7 a	Medio
<i>Mg</i> (meq 100g ⁻¹)	0.4±0.06 b	Muy bajo	0.6±0.09 a	Bajo
<i>Na</i> (meq 100g ⁻¹)	0.1±0.04 b	Libre de sales	0.3±0.12 a	Bajo
<i>CIC</i> (meq 100 g ⁻¹)	4.81±0.61 b	Muy bajo	6.0±0.12 a	Bajo
<i>pH</i>	6.2±0.18 a	Moderadamente ácido	6.4±0.19 a	Moderadamente ácido
<i>CE</i> (mS cm ⁻¹)	0.06±0.02 a	Libre de sales	0.05±0.01 a	Libre de sales

Medias con letras distintas en la misma fila indican diferencia significativa ($p<0.05$) según prueba *t* de *Student*.

En particular, el mayor contenido de *N* en la Plantación B podría explicar la mejor acumulación de área basal, dado que este nutrimento suele ser limitante para el crecimiento de especies del género *Pinus*, porque influye directamente en la producción de biomasa leñosa (Prescott, 2002; Vitousek & Howarth, 1991). El mejor

nivel de P en la Plantación A se relaciona con su vocación forestal, ya que la Plantación B históricamente se había utilizado con fines agrícolas, lo cual redujo el elemento disponible. Se han observado bajos niveles de P en el suelo de PFC establecidas en parcelas de uso agrícola (García-Martínez et al., 2024). La alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y disponibilidad de Ca y Mg , favorecen el desarrollo radicular y la eficiencia en la absorción de nutrientes (Weil & Brady, 2017). Las condiciones edáficas superiores de esta plantación explican el crecimiento radial y almacén de C por árbol. El diámetro y área basal son altamente sensibles a la fertilidad del suelo y constituyen los principales predictores del carbono aéreo en árboles (Balderas-Torres & Lovett, 2013; Chave et al., 2014).

Características del arbolado

La mayor altura promedio de los árboles registrada en la Plantación A (Cuadro 3) se relacionó con la alta densidad de individuos, la cual incrementó la competencia por luz y favoreció el crecimiento apical. En plantaciones forestales, a edades superiores a los 20 años, las altas densidades muestran efectos positivos en el crecimiento de la altura (Kremer et al., 2025). Esto se debe a que, en rodales densos, los árboles priorizan la elongación del fuste para acceder al dosel superior (Poorter et al., 2017; Pretzsch & Schütze, 2016).

Cuadro 3. Características de los árboles en dos plantaciones forestales comerciales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., localizadas en Villa de Allende, Estado de México, México.

Localidad	Altura (m)	Diámetro (cm)	Área basal (cm ²)	Carbono (kg árbol ⁻¹)
Plantación A	20.8±3.3 a	19±4.4 b	300.8±131 b	68.7±33 b
Plantación B	19.4±3 b	22.8±6 a	434.4±219 a	104.9±60 a

Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencia significativa ($p<0.05$) según prueba *t* de Student.

En la Plantación B, el mayor crecimiento en diámetro y área basal de los árboles, podría explicar una menor competencia entre individuos y más disponibilidad de recursos por árbol, como agua, nutrientes y espacio de crecimiento. Louw y Scholes (2006) observaron correlaciones positivas entre el Índice de sitio (*IS*) y propiedades del suelo, lo cual, indica que la disponibilidad de humedad y nutrientes desempeña un papel fundamental en la productividad del sitio, y favorece mayores tasas de crecimiento y rendimiento maderable en *P. patula*. En la misma especie, García-Aguilar et al. (2017) concluyeron que los rodales clasificados como de calidad excelente ($IS>33$) registraron diámetros promedio de 38.5 cm y alturas de 34.5 m, mientras que en sitios de calidad baja ($IS<24$) los valores fueron de 26.0 cm y 22.6 m, respectivamente. Debido a que el volumen maderable depende principalmente del diámetro y la altura de los árboles, estos resultados sugieren una mayor producción potencial de madera en los sitios con mejor calidad.

Con respecto a la distancia de plantación, en *Pinus taeda* L. el diámetro de los árboles, después de 24 años, fue menor en plantaciones con altas densidades (Jeton-Cardoso et al., 2013). Por ello, la reducción en la densidad de plantación favorece la expansión radial del fuste, incrementando el área basal y el volumen maderable (Pretzsch & Schütze, 2016).

La densidad de individuos en las plantaciones afecta las tasas de crecimiento en biomasa (Avendaño-Yáñez et al., 2019). La cantidad de C almacenado por árbol es diferente al que se almacena en la plantación. En el presente estudio, la Plantación A almacenó 36.2 kg menos de C por individuo, a pesar de contar con más árboles por hectárea. No obstante, esta diferencia no se reflejó en el C aéreo almacenado por unidad de superficie que fue de 75.6 y 73.7 Mg ha⁻¹ para la Plantación A y la Plantación B, respectivamente. Existe evidencia de que los rodales densos tienden a maximizar la altura, pero no necesariamente la biomasa individual (Poorter et al., 2017). Estudios realizados en plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*, indican que la biomasa arbórea presenta una correlación positiva con la densidad de plantación en edades tempranas (hasta los 25 años), sin embargo, a largo plazo la densidad de plantación (833 a 2 500 árboles ha⁻¹) no muestran diferencia en la acumulación de biomasa y almacén de carbono (Marziliano et al., 2015). Por otro lado, Kholdaenko et al. (2022) observaron, en *Picea obovata* Ledeb., que la productividad a nivel de árbol (volumen del tronco y área basal) se afectó negativamente por la densidad del rodal, mientras que la productividad del rodal se favoreció.

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten sugerir prácticas silvícolas efectivas, como el aclareo, para favorecer el crecimiento de los árboles, ya que no es común que en la zona de estudio se realicen estas actividades en las PFC. En plantaciones de *Pinus taeda* se demostró que el aclareo temprano (17 años) mejora significativamente la acumulación de biomasa, la captura y el almacén de carbono en comparación con el aclareo tardío (32 años) o en rodales sin aclareo (Tavankar et al., 2025). Finalmente, los sistemas de producción forestal son claves para alcanzar los objetivos de cero emisiones netas de CO₂, por lo cual, la mitigación del cambio climático es una prioridad fundamental en un ámbito tradicionalmente dominado por la producción de madera y la conservación de la biodiversidad (Olsson & Johansson, 2025). Por ello, el manejo forestal actual debe equilibrar la rentabilidad económica derivada de la producción maderable con el secuestro de CO₂ (Hiltunen et al., 2021).

Modelos de diámetro-altura

Los 14 modelos ajustados obtuvieron valores bajos en el Coeficiente de determinación, este osciló entre 0.25 y 0.34 (Cuadro 4), dichos modelos suelen presentar esa variabilidad. De acuerdo con la calificación final, las funciones con los mejores valores en los criterios de ajuste fueron MG1 y MS con calificaciones finales de 5 y 10 respectivamente, sin embargo, la línea de predichos de ambos modelos no es congruente con el crecimiento biológico de los árboles, ya que, en individuos con diámetros mayores, la línea ajustada tiende a decrecer, caso contrario con el modelo MT1, el cual, a pesar de que la línea se hace asíntota, tiende a representar mejor la biología del crecimiento de los árboles. En consecuencia, se eligió este último modelo para predecir la altura de los árboles (Figura 2). Los residuales del modelo seleccionado presentaron normalidad ($W=0.9924$, $p>0.05$) (Figura 2). La interpretación biológica fue considerada como un criterio complementario al ajuste estadístico.

Cuadro 4. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos analizados para modelar la altura de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en dos plantaciones de Villa de Allende, Estado de México, México.

Modelo	CME	RCME	R²	AICc	BIC	CF
MG1	4.5 (1)	2.13 (1)	0.34 (1)	776.72 (1)	789.29 (1)	5
MS	4.52 (2)	2.14 (2)	0.33 (2)	777.51 (2)	790.08 (2)	10
MT1	4.66 (3)	2.17 (3)	0.31 (3)	782.89 (3)	795.46 (3)	15
MC	4.68 (4)	2.18 (4)	0.31 (4)	783.66 (4)	796.23 (4)	20
MG2	4.82 (10)	2.2 (8)	0.29 (8)	787.05 (7)	796.51 (5)	38
MC5	4.83 (11)	2.21 (11)	0.29 (11)	787.34 (9)	796.8 (6)	48
MC3	4.87 (12)	2.22 (12)	0.28 (12)	788.93 (12)	798.39 (7)	55
MC2	4.75 (5)	2.19 (5)	0.3 (5)	786.26 (5)	798.83 (8)	28
MC4	4.75 (6)	2.19 (6)	0.3 (6)	786.26 (6)	798.83 (9)	33
MC1	4.77 (7)	2.2 (7)	0.3 (7)	787.18 (8)	799.75 (10)	39
MT2	4.8 (8)	2.21 (9)	0.29 (9)	788.23 (10)	800.8 (11)	47
MC7	4.8 (9)	2.21 (10)	0.29 (10)	788.33 (11)	800.9 (12)	52
MC6	5 (13)	2.24 (13)	0.26 (13)	793.38 (13)	802.84 (13)	65
MG3	5.12 (14)	2.27 (14)	0.24 (14)	797.73 (14)	807.19 (14)	70

CME = Cuadrado medio del error; *RCME* = Raíz del cuadrado medio del error;
AICc = Criterio de información de *Akaike* corregido; *BIC* = criterio de información Bayesiano; *CF* = Calificación final.

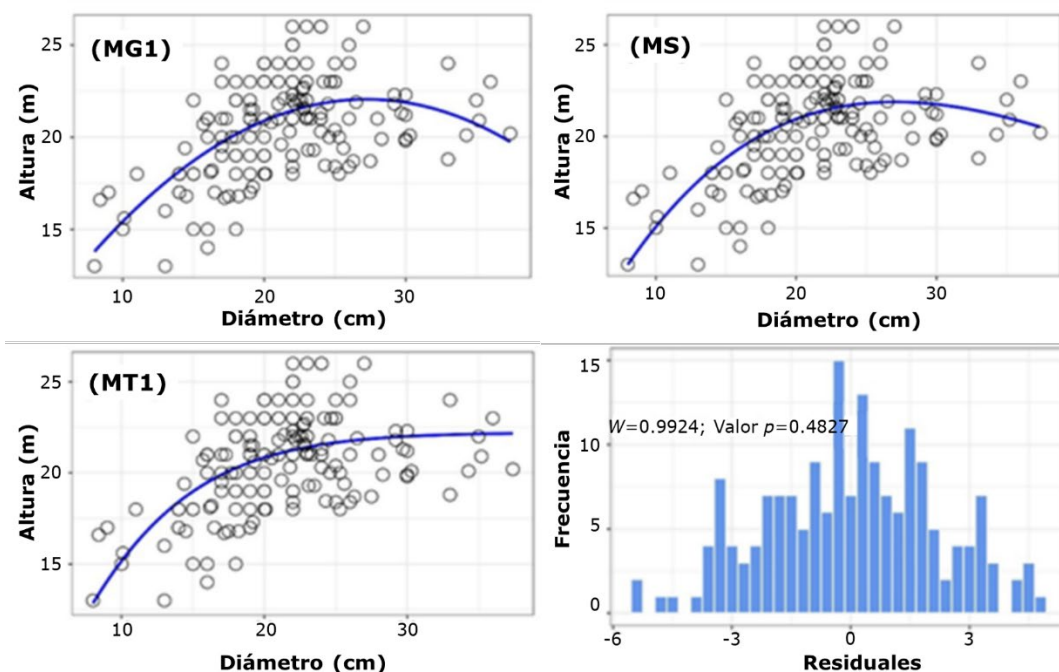


Figura 2. Gráfica de valores observados y predichos (línea azul) del modelo MT1 ajustado para predecir altura en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., e histograma de los residuales del modelo seleccionado.

De acuerdo con los valores de significancia de los parámetros de los modelos ajustados la mayoría resultaron significativos; sin embargo, cinco modelos no tuvieron todos sus parámetros con significancia estadística (MT2, MC1, MC2, MC4 y MC7) (Cuadro 5). Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con los datos publicados por García-Cuevas *et al.* (2017), quienes obtuvieron coeficientes altamente significativos; sin embargo, difieren en los valores de R^2 ya que estos autores obtuvieron valores superiores a 0.90 para relaciones alométricas en especies tropicales de Quintana Roo. No obstante, la ausencia de significancia en algunos parámetros de los modelos MT2, MC1, MC2, MC4 y MC7 sugiere una baja contribución explicativa de la variable independiente, situación que también ha sido documentada en modelos altura-diámetro, donde la variabilidad biológica y la heterogeneidad estructural del rodal dificultan la obtención de parámetros robustos (Quiñónez-Barraza *et al.*, 2012). En particular, la modelación de la altura total en función del diámetro suele presentar bajos coeficientes de determinación y mayor dispersión residual en comparación con

los modelos de diámetro o volumen, debido a la influencia de factores ecológicos y de competencia no incorporados explícitamente en la ecuación (García-Cuevas et al., 2017; Quiñónez-Barraza et al., 2012).

Cuadro 5. Valores y significancia de los coeficientes de los modelos analizados para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Modelo	b_0	$Pr(> t)$	b_1	$Pr(> t)$	b_2	$Pr(> t)$
MC	22.4307	<0.0001	0.1515	0.0003	1.52138	0.0394
MT1	22.2116	<0.0001	0.0605	<0.0001	1.27810	<0.0001
MT2	3.2303	<0.0001	3.5234	0.0221	-2.42738	0.3536
MC1	23.8586	<0.0001	16.2435	0.3647	1.58630	0.0023
MC2	1.9906	0.0003	2.1244	0.4258	0.04272	<0.0001
MC3	27.3390	<0.0001	6.5510	<0.0001		
MC4	23.4098	<0.0001	0.0201	0.4094	1.99063	0.0004
MC5	26.5416	<0.0001	5.1666	<0.0001		
MC6	9.1117	<0.0001	-0.7402	<0.0001		
MC7	27.3686	0.829	-104.2119	0.8600	-0.97780	0.4800
MS	2.3824	0.0023	0.8763	<0.0001	-0.00754	<0.0001
MG1	5.5012	0.0030	1.2156	<0.0001	-0.02232	<0.0001
MG2	26.3438	<0.0001	-4.8829	<0.0001		
MG3	2.2923	<0.0001	0.2426	<0.0001		

$Pr(>|t|)$ = Significancia estadística al 95 % asociado a cada coeficiente en un modelo de regresión; b_0 , b_1 , b_2 = Parámetros del modelo de regresión.

En este sentido, aunque la mayoría de los modelos muestran validez estadística global, se requieren evaluar transformaciones adicionales, inclusión de variables dendrométricas complementarias o incluso enfoques de efectos mixtos para capturar la variabilidad intra e interespecífica del sitio e incluso interpretar con cautela los resultados de los modelos ajustados.

En México se han generado diversos modelos alométricos, pero la diversidad de especies y condiciones ambientales incrementan la necesidad de desarrollar nuevos modelos con menos errores (Hernández-Ramos *et al.*, 2024), particularmente en áreas con vocación forestal. Las ecuaciones generadas son aplicables para inventarios forestales, así como la reconstrucción de escenarios después de una intervención silvícola o la ocurrencia de fenómenos naturales catastróficos (García-Cuevas *et al.*, 2017), así como para la predicción del rendimiento previo al establecimiento de nuevas PFC.

Conclusiones

La fertilidad del suelo y la densidad de plantación fueron los factores con mayor influencia sobre el crecimiento y la productividad de los árboles en las plantaciones de *Pinus patula* estudiadas. Los árboles de la Plantación B, con mayores contenidos de *MOS*, *N*, *Ca*, *Mg* y *CIC* presentaron mayor diámetro, área basal y acumulación de carbono, mientras que la mayor densidad de la Plantación A, favoreció el crecimiento en altura por efecto de competencia por luz. A pesar de las diferencias observadas a nivel individual, el almacén de carbono por hectárea fue similar entre plantaciones, lo que evidencia un efecto compensatorio entre densidad y crecimiento individual. El modelo alométrico MT1 fue la opción viable para estimar la altura a partir del diámetro. Estos resultados destacan la importancia de considerar conjuntamente las condiciones edáficas y el manejo silvícola para optimizar la producción de madera y el almacén de carbono en las PFC estudiadas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Ingeniera Forestal Iridia González Consuelo por las facilidades para la obtención de datos en las parcelas estudiadas.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución por autor

René García Martínez: planeación y ejecución del trabajo de campo y laboratorio, redacción del manuscrito; Maricruz Tenorio Calixto: ejecución del trabajo de campo y laboratorio, y procesamiento de información geográfica; Juan Carlos Montoya Jiménez: análisis estadístico de datos, procesamiento de información geográfica y redacción del manuscrito; Luis Alberto León Bañuelos: redacción y revisión del manuscrito; Marlín Pérez Suárez: redacción y revisión del manuscrito.

Referencias

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz-Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.
<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/es/article/view/1297/>
- Aparicio-Rentería, A., Juárez-Cerrillo, S. F., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2014). Propagación por enraizamiento de estacas y conservación de árboles plus extintos de

- Pinus patula* procedentes del norte de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20(1), 85-96. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201178>
- Avendaño-Yáñez, M. de la L., Sánchez-Velásquez, L. R., Martínez-Ramírez, D., Perroni, Y., Ibarra-Zavaleta, S. P., Alarcón, E., & Pineda-López, M. del R. (2019). Almacén de carbono en biomasa aérea de plantaciones experimentales con especies de sucesión temprana del bosque mesófilo de montaña. *Botanical Sciences*, 97(1), 82-88. <https://doi.org/10.17129/botsci.2031>
- Balderas-Torres, A., & Lovett, J. C. (2013). Using basal area to estimate aboveground carbon stocks in forests: La Primavera Biosphere's Reserve, Mexico. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 86(2), 267-281. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps084>
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (2013). *Ecology and Management of Forest Soils* (4th ed.). Wiley-Blackwell. <https://www.thenile.com.au/books/dan-binkley/ecology-and-management-of-forest-soils/9780470979471?srsId=AfmBOorsM1AMi4myIr08LV7TNsmrmgd14JKz2qdU5s1h4DWmlowkCfYH>
- Castellanos, J. F., Velázquez-Martínez, A., Vargas-Hernández, J., Rodríguez-Franco, C., & Fierros-González, A. M. (1996). Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 30(1), 123-128. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1351>
- Castillo-Gallegos, E., Jarillo-Rodríguez, J., & Escobar-Hernández, R. (2018). Diameter-height relationships in three species grown together in a commercial forest plantation in eastern tropical Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(1), 33-48. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.05.033>
- Chau, J. (2025). *gslNls: GSL Multi-Start Nonlinear Least-Squares Fitting* (R package version 1.4.2) [Software]. Comprehensive R Archive Network. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.gslNls>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., ..., & Vieilledent, G. (2014).

- Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clutter, J. L., Fortson, F. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber Management: a quantitative approach*. John Wiley & Sons, Inc. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=494294>
- Comisión Nacional Forestal. (2015, 29 de diciembre). *Programa de financiamiento a Plantaciones Forestales Comerciales*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/programa-de-financiamiento-a-plantaciones-forestales-comerciales#:~:text=Una%20plantaci%C3%B3n%20forestal%20comercial%20es,su%20industrializaci%C3%B3n%20y/o%20comercializaci%C3%B3n>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Standard operating procedure for soil available phosphorus. Olsen method* (White paper). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d69a78fc-3ccd-4a9d-a77a-7e729be66c4a/content>
- García-Aguilar, J. Á., Velasco-Velasco, V. A., Rodríguez-Ortiz, G., & Enríquez-del Valle, J. R. (2017). Influencia de la calidad de sitio sobre el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 1-23. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.108>
- García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., Quiñonez-Barraza, G., Tamarit-Urías, J. C., & García-Espinoza, G. G. (2017). Predicción del diámetro normal, altura y volumen a partir del diámetro del tocón en especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43), 89-116. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i43.67>
- García-Cuevas, X., Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J., Hernández-Ramos, A., Rueda-Sánchez, A., Hernández-Ramos, J., & Orozco-Gutiérrez, G. (2022). Aportaciones científicas del Programa de Plantaciones Forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70), 3-41. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1162>

- García-Martínez, R., Hernández-Soto, F. N., Emeterio-Moreno, J., & Colín-Velázquez, M. K. (2024). Diferencias en la fertilidad del suelo en cuatro plantaciones forestales comerciales de pino en Amanalco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85), 150-170. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1462>
- Guerra-De la Cruz, V., Islas-Gutiérrez, F., Flores-Ayala, E., Acosta-Mireles, M., Buendía-Rodríguez, E., Carrillo-Anzures, F., Tamarit-Uriás, J. C., & Pineda-Ojeda, T. (2019). Modelos locales altura-diámetro para *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. en Nanacamilpa, Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(51), 133-156. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.407>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson. https://www.researchgate.net/publication/366175716_Soil_Fertility_and_Fertilizers_by_John_L_Havlin_z-liborg
- Hernández-Ramos, J., Barrera-Ramírez, R., Muñoz-Flores, H. J., Gómez-Cárdenas, M., Rubio-Camacho, E. A., & García-Espinoza, G. G. (2024). Modelo generalizado altura total-diámetro normal para plantaciones de *Pinus leiophylla* en Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), Article e4139. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4139>
- Hiltunen, M., Strandman, H., & Kilpeläinen, A. (2021). Optimizing forest management for climate impact and economic profitability under alternative initial stand age structures. *Biomass and Bioenergy*, 147, Article 106027. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106027>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1978). *Carta Edafológica. Villa de Allende. Clave E14A36* [Cartas edafológicas]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825279332>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Clave E14A36* [Cartas climatológicas]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Jeton-Cardoso, D., Biscaia-Lacerda, A. E., Doetzer-Rosot, M. A., Cordeiro-Garrastazú, M., & Teixeira-Lima, R. (2013). Influence of spacing regimes on the development of

- loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 310, 761-769. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.021>
- Kholdaenko, Y. A., Belokopytova, L. V., Zhirnova, D. F., Upadhyay, K. K., Tripathi, S. K., Koshurnikova, N. N., Sobachkin, R. S., Babushkina, E. A., & Vaganov, E. A. (2022). Stand density effects on tree growth and climatic response in *Picea obovata* Ledeb. plantations. *Forest Ecology and Management*, 519, Article 120349. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120349>
- Kremer, K., Jonsson, B.-G., Tavares, M. F., & Bauhus, J. (2025). Effects of planting density on the performance of reforestation and afforestation plantings in temperate and boreal forests: a systematic review. *Restoration Ecology*, 33(5), Article e70103. <https://doi.org/10.1111/rec.70103>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Liao, C., Luo, Y., Fang, C., & Li, B. (2010). Ecosystem carbon stock influenced by plantation practice: Implications for planting forests as a measure of climate change mitigation. *PLoS ONE*, 5(5), Article e10867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010867>
- Louw, J. H., & Scholes, M. C. (2006). Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 225(1-3), 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.048>
- Martínez-Campos, A. L., Gómez-Guerrero, A., Ángeles-Pérez, G., & Padilla-Cuevas, J. (2025). Cambios en la cantidad y calidad del carbono del suelo por efecto del aprovechamiento forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(92), 137-159. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i92.1584>
- Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R. D., & Pompa-García, M. (2013). Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(3), 35-49. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000300004
- Marziliano, P. A., Coletta, V., Menguzzato, G., Nicolaci, A., Pellicone, G., & Veltri, A. (2015). Effects of planting density on the distribution of biomass in a douglas-fir

- plantation in southern Italy. *iForest–Biogeosciences and Forestry*, 8(3), 368-376. <https://doi.org/10.3832/ifor1078-007>
- Meza-Pérez, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 163-170. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108002.pdf>
- Monárrez-González, J. C., Márquez-Linares, M. A., López-Hernández, J. A., Pérez-Verdín, G., Quiñonez-Barraza, J., & García-Cuevas, X. (2024). Ecuaciones de volumen fustal-total y ahusamiento para especies maderables del ecosistema templado en Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 4-28. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1440>
- Muñoz-Flores, H. J., Sáenz-Reyes, J. T., Barrera-Ramírez, R., Hernández-Ramos, J., & Gómez-Cárdenas, M. (2021). Diagnóstico de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L. f. en el trópico seco de Michoacán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), Artículo e3058. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3058>
- Olsson, A., & Johansson, J. (2025). Legitimising different futures: Swedish forest management as a climate change mitigation measure. *Environmental Science & Policy*, 171, Article 104174. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104174>
- Osman, K. T. (2013). *Soils. Principles, properties, and management*. Springer. <https://books.google.com.mx/books?id=pZ0rVya6CW4C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A., & Mäkipää, R. (2012). Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management*, 270, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.004>
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 157-173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>

- Pompa-García, M., & Domínguez-Calleros, P. A. (2015). Respuesta de madera temprana y tardía a la sequía en una conífera mexicana bajo dos condiciones ecológicas. *Ecosistemas*, 24(2), 37-42. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-2.06>
- Poorter, L., van der Sande, M. T., Arets, E. J. M. M., Ascarrunz, N., Enquist, B. J., Finegan, B., Licona, J. C., Martínez-Ramos, M., Mazzei, L., Meave, J. A., Muñoz, R., Nytch, C. J., de Oliveira, A. A., Pérez-García, E. A., Prado-Junior, J., Rodríguez-Velázquez, J., Ruschel, A. R., Salgado-Negret, B., Schiavini, I., ..., Peña-Claros, M. (2017). Biodiversity and climate determine the functioning of Neotropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 26(12), 1423-1434. <https://doi.org/10.1111/geb.12668>
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo-Reguerín, M., & Poch-Claret, R. M. (2019). *Edafología. Uso y protección de suelos* (4ta ed.). Mundi-Prensa Libros. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=790155>
- Prescott, C. E. (2002). The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology*, 22(15-16), 1193-1200. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.15-16.1193>
- Pretzsch, H., & Schütze, G. (2016). Effect of tree species mixing on the size structure, density, and yield of forest stands. *European Journal of Forest Research*, 135, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0913-z>
- Qiao, R., Song, Z., Chen, Y., Xu, M., Yang, Q., Shen, X., Yu, D., Zhang, P., Ding, C., & Guo, H. (2024). Planting density effect on poplar growth traits and soil nutrient availability, and response of microbial community, assembly and function. *BMC Plant Biology*, 24, Article 1035. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05648-7>
- Quiñónez-Barraza, G., Cruz-Cobos, F., Vargas-Larreta, B., & Hernández, F. J. (2012). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 23-39. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.535>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (version 4.5.2) [Software]. The R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Sáez-Plaza, P., Navas, M. J., Wybraniec, S., Michalowski, T., & García-Asuero, A. (2013). An overview of the Kjeldahl method of nitrogen determination. Part II.

- Sample preparation, working scale, instrumental finish, and quality control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 224-272. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751787>
- Salcedo-Pérez, E., Ruiz-Blandon, B. A., Hernández-Álvarez, E., González-Cruz, R., Bernabé-Antonio, A., Orozco-Guareño, E., Ramírez-López, C. B., Hernández, J. A., & Delgado-Fornué, E. (2019). Propiedades del suelo y nitrógeno como indicadores del crecimiento en plantaciones comerciales de teca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 33-54. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.398>
- Santiago-García, W., Pérez-López, E., Quiñonez-Barraza, G., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, E., Ruiz-Aquino, F., & Tamarit-Urias, J. C. (2017). A dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests*, 8(12), Article 465. <https://doi.org/10.3390/f8120465>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/717582>
- Sharma, R. P. (2009). Modelling height-diameter relationship for Chir pine trees. *Banko Janakari*, 19(2), 3-9. <https://doi.org/10.3126/banko.v19i2.2978>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Sleutel, S., De Neve, S., Singier, B., & Hofman, G. (2007). Quantification of organic carbon in soils: a comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(19-20), 2647-2657. <https://doi.org/10.1080/00103620701662877>
- Tavankar, F., Picchio, R., Nikooy, M., Karamdost-Marian, B., Venanzi, R., Lo-Monaco, A. (2025). Impact of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation management on biomass, carbon sequestration rates and storage. *Sustainability*, 17(3), Article 888. <https://doi.org/10.3390/su17030888>
- Temesgen, H., Zhang, C. H., & Zhao, X. H. (2014). Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study

from Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 316, 78-89.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.035>

Torres-Rojo, J. M. (2021). Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 66-91. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>

Uramoto, T., Sakoda, M., Guo, Y., Sakagami, N., Komatsuzaki, M., & Nishizawa, T. (2025). No-tillage effects on the soil nitrogen-cycling prokaryotic community inhabiting soil aggregates in upland fields. *Applied Soil Ecology*, 213, Article 106232. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106232>

Vargas-Larreta, B., Amezcua-Rojas, M., López-Martínez, J. O., Cueto-Wong, J. A., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A., & Aguirre-Calderón, C. G. (2023). Estimación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Botanical Sciences*, 101(1), 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsoci.3094>

Vitousek, P. M., & Howarth, R. W. (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 13, 87-115. <https://doi.org/10.1007/BF00002772>

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education, Inc. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition

West, P. W. (2015). *Tree and forest measurement*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14708-6>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.