

Modelo altura-diámetro para *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región forestal de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla

Height-diameter model for *Pinus patula* Schl. et Cham. in Chignahuapan-Zacatlán forest region, Puebla

Jonathan Hernández-Ramos¹, Vidal Guerra-De la Cruz², Enrique Buendía-Rodríguez³, Juan Carlos Tamarit-Urias⁴, Gerónimo Quiñonez-Barraza⁵ y Xavier García-Cuevas¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Chetumal. Othón P. Blanco, Quintana Roo, México. ²INIFAP-Sitio Experimental Tlaxcala. Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala, México. ³INIFAP-Campo Experimental Valle de México, Texcoco, Estado de México, México. ⁴INIFAP-Campo Experimental San Martinito. San Martinito Tlahuapan, Puebla, México. ⁵INIFAP-Campo Experimental Valle del Guardian, Durango, Durango, México. * Autor de correspondencia; correo-e: forestjonathanhdez@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Una de las variables dasométricas que requieren mayor inversión de tiempo y recursos para su medición en un inventario forestal es la altura total (A) de los árboles. Por su relación con la productividad forestal, es importante contar con una herramienta que contribuya a su estimación con certidumbre para reducir esfuerzos en las actividades de campo; por lo que, el ajuste de modelos matemáticos es una alternativa eficiente y útil para este fin en los planes de manejo.

Las prácticas silvícolas modifican el crecimiento en altura de los rodales y su relación alométrica con el diámetro normal (d), lo cual influye en la productividad maderable. Por tal motivo, el objetivo fue evaluar el efecto de diferentes tratamientos silvícolas en la relación $A-d$ para *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región forestal Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó a partir de información de $A-d$ obtenida en 1662 árboles de *Pinus patula* en cuatro predios forestales pertenecientes a la UMAFOR 2108 Chignahuapán-Zacatlán, ubicada en la sierra norte del estado de Puebla, México. El rango de elevación es de 1200 a 3500 m y el clima es del tipo Cwb , templado con verano fresco y régimen de lluvias en verano. Las temperaturas promedio mensuales varían de 10° C en los meses más fríos, a 16° C en los meses más cálidos, con máximas entre 20° C y 24° C. La precipitación media anual es de 710 mm (García, 1987).

Los rodales evaluados de cada predio se caracterizaron por tener diferentes tratamientos silvícolas, los cuales, fungieron como variables indicadoras (I) dentro del ajuste estadístico como primer aclareo (1), segundo aclareo (2), tercer aclareo (3), corta de regeneración (4), corta de liberación (5) y corta de selección (6), además, se incluyó un área de conservación (7).

Se ajustó el modelo de Chapman-Richards (ec. 1) con la función de modelos no lineales generalizados ($gnls$) del programa estadístico R bajo el enfoque de variables *dummy* (variables indicadoras). La inclusión de la variable indicadora (I) dentro del modelo asumió que las distintas prácticas silvícola afectan de manera directa el valor del parámetro asintótico (a), siendo específicos para cada condición.

$$A = (a \cdot I_i) \cdot (1 - e^{-b \cdot d})^c \quad (\text{ec. 1})$$

Donde, A = altura total (m), d = diámetro normal (cm), I_i = valor del parámetro asintótico referente a cada variable indicadora por tratamiento silvícola, b y c = parámetros fijos a estimar.

En el ajuste estadístico se incluyó una estructura de varianza de tipo: varComb (Varexp-Varpower) para modelar los residuos (Zuur et al., 2009).

El ajuste estadístico fue evaluado a través de los valores en el coeficiente de determinación (R^2), raíz del cuadrado medio del error ($RCME$) y el sesgo promedio por estimación (\bar{E}). Además, se verificaron los supuestos de regresión de normalidad y homocedasticidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk (SW) y Kolmogorov-Smirnov (KS), respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ajuste mostró parámetros significativos ($p < 0.05$) para cada condición de manejo, en donde el valor del parámetro a es específico para cada tratamiento (Cuadro 1).

El modelo explicó el 66 % de la variabilidad ($R^2=0.6602$), la $RCME$ fue de 2.24 m y cumplió con los supuestos de normalidad ($W=0.99892$, p -value=0.4182) y homocedasticidad ($KS=0.013673$, p -value=0.9152) de acuerdo con la prueba de SW y KS . El sesgo promedio por estimación fue de -0.00124475 m.

Cuadro 1. Valor específico de cada condición de rodal de *Pinus patula*.

Parámetro	Valor inferior	Estimación	Valor superior	Error estándar	Valor t	p -valor
a_1	28.914	44.640	60.365	8.017	5.568	<0.0001
a_2	34.274	53.165	72.056	9.631	5.520	<0.0001
a_3	28.933	44.322	59.712	7.846	5.649	<0.0001
a_4	32.872	49.111	65.350	8.279	5.932	<0.0001
a_5	31.213	48.217	65.220	8.669	5.562	<0.0001
a_6	29.484	46.259	63.034	8.553	5.409	<0.0001
a_7	31.252	47.974	64.696	8.525	5.627	<0.0001
b	0.005	0.015	0.026	0.005	2.812	0.005
c	0.729	0.844	0.959	0.059	14.425	<0.0001

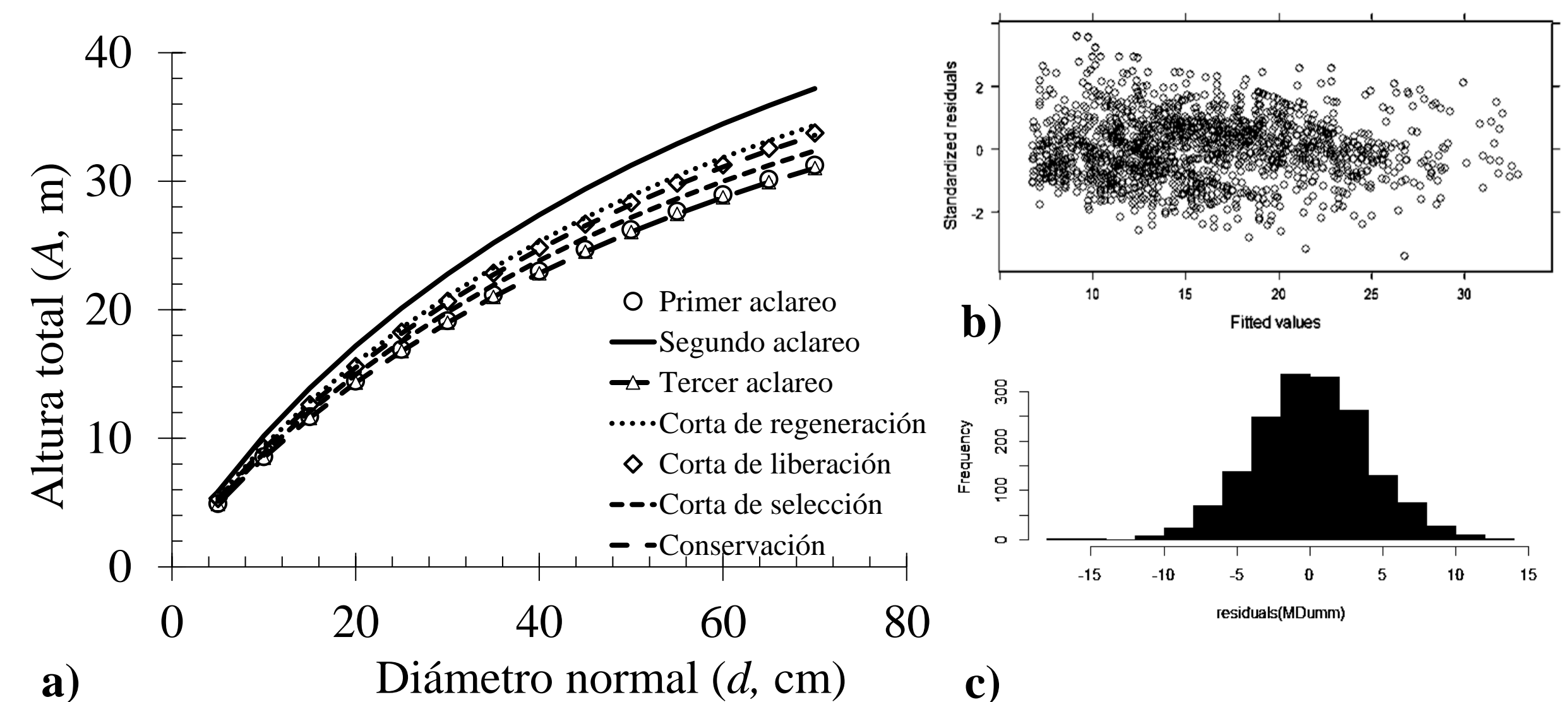


Figura 1. Estimación $A-d$ por condición de rodal (a), distribución de residuales (b) y frecuencia de los residuos (c) del ajuste.

Este tipo de ajuste puede mejorar la precisión al estimar la $A-d$ e incluir variables indicadoras (Quiñonez et al., 2020) o diferenciar la dinámica de crecimiento con precisión al emplear índices de productividad como variables *dummy* para proponer parámetros específicos por cada condición (Duan et al., 2016), y para disminuir los errores al calcular las existencias volumétricas en los rodales.

CONCLUSIÓN

Las prácticas silvícola aplicadas a los rodales tienen un efecto en la altura (A), misma que varía en función de las condiciones de productividad del sitio implícito en cada tipo de tratamiento aplicado. El ajuste de modelos matemáticos con inclusión de variables indicadoras es una alternativa viable, se recomienda usar valores específicos en a del modelo $A-d$ para evitar desviaciones en las estimaciones que puedan tener impactos adversos en los programas de manejo para esta especie.

REFERENCIAS

- Duan, G., Gao, Z., Wang, Q., & Fu, L. (2018). Comparison of different height-diameter modelling techniques for prediction of site productivity in natural uneven-aged pure stands. *Forests*, 9(2), 1–18.
- Quiñonez-Barraza, G., Zhao, D., & De los Santos-Posadas, H. M. (2020). Height-diameter-age equation systems for *Pinus arizonica* Engelmann and *P. durangensis* Martínez in mixed-species stands in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 221–240.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. © Springer Science+Business Media, LLC 2009. New York, USA. 574 p.