

ÍNDICE DE SITIO PARA *Pinus montezumae* Lamb. EN LA REGIÓN DE CD. HIDALGO, MICHOACÁN

SITE INDEX FOR *Pinus montezumae* Lamb. AT THE REGION OF HIDALGO CITY, MICHOACÁN

Eladio Heriberto Cornejo Oviedo^{1*}, Jordán Alejandro Pereyra Goicochea², Oscar Mares Arreola³, Salvador Valencia Manzo¹ y Celestino Flores López¹

¹Departamento Forestal, División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Domicilio conocido. Buenavista, C.P. 25315 Saltillo, Coah.. Tel. y Fax 01 (844) 411-0396. Correo electrónico: cor61@prodigy.net.mx ² Comisión Nacional Forestal. Tuxtla Gutiérrez, Chis. ³Programa Docente de Postgrado en Ciencias Forestales (UAAAN). Domicilio conocido. Buenavista. C. P. 25315 Saltillo, Coah.

* Autor para correspondencia

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue comparar los métodos de la curva guía y estimación del parámetro al determinar el índice de sitio para *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich. Se utilizó regresión no lineal para ajustar 634 pares de valores altura-edad procedentes de análisis troncal de 40 árboles dominantes. Con el método de la curva guía se probaron cinco modelos de crecimiento; y el de Gompertz fue el mejor porque presentó el valor más bajo del cuadrado medio del error (CME=11.145) y el valor más alto del coeficiente de determinación ($R^2=0.973$); con dicho modelo se generaron cinco curvas de índice de sitio con interceptos diferentes, pero con pendiente constante que conforman curvas anamórficas. Con el método de la estimación del parámetro se usó el modelo de Chapman-Richards que presentó buen ajuste, dado su bajo valor del CME (10.186) y alto valor de R^2 (0.976). Con dicho modelo se obtuvieron cinco curvas de índice de sitio con interceptos comunes, con asíntotas que se incrementan con los índices de sitio y con una estimación de cero en la altura a una edad cero, que configuran curvas polimórficas. Los índices de sitio determinados con el método de la predicción del parámetro cubrieron con mayor confiabilidad y fidelidad la distribución de *P. montezumae* que con el método de la curva guía. En consecuencia, los índices de sitios determinados con el método de la predicción del parámetro deben usarse para la clasificación de la productividad en los bosques de *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Palabras clave: *Pinus montezumae*, índice de sitio, análisis troncal.

SUMMARY

The objective of this study was to compare the guide curve and the parameter prediction methods to determine the site index for *P. montezumae* in the Ciudad Hidalgo, Mich. region. Non linear regression was used to fit 634 height-age values collected from 40 dominant trees by stem analysis. Five growth models were tested utilizing the guide curve method. The Gompertz model was the best since it had the lowest value of the mean square error (MSE=11.145) and the highest value of the coefficient of determination ($R^2=0.973$); based on this model, five site index curves were obtained with different inter-

cepts and a constant slope which generated anamorphic curves. The Chapman-Richards model was used for the parameter prediction method; this model had a good fit because of its low MSE value (10.186) and high R^2 value (0.976). Five index curves were also obtained with the parameter prediction method which had a common intercept with height asymptote increasing with site index and zero height at age zero, and the resulting curves were polymorphic. The site index curves determined with the parameter prediction method covered better the distribution of *P. montezumae* than the guide curve method. Therefore, the site index curves determined with the parameter prediction method should be used for classifying site productivity in the forests where *P. montezumae* is found at the region of Ciudad Hidalgo, Michoacán.

Index words: *Pinus montezumae*, site index, stem analysis.

INTRODUCCIÓN

Michoacán cuenta con 1 540 493 ha de bosques de coníferas y latifoliadas (SEMARNAP, 1999). En la región de Cd. Hidalgo, Mich., el manejo de los bosques de pino-encino constituye una de las principales actividades económicas, por lo que es necesario clasificarlos de acuerdo con su capacidad productiva para aplicar los tratamientos silvícolas adecuados. La clasificación de la productividad de los bosques es una herramienta básica y esencial en el manejo integral del bosque, ya que es uno de los criterios más importantes a considerar al momento de realizar una prescripción silvícola (Daniel *et al.*, 1982). La clasificación de la productividad se efectúa mediante la determinación de la calidad de estación, la cual se define como una cualidad distintiva que indica de manera relativa la máxima producción de madera que un bosque o especie en particular puede producir en un tiempo determinado en un

microclima (Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Zepeda y Rivero, 1984).

Para determinar la calidad de estación se ha recurrido a la utilización del índice de sitio, el cual se define como la máxima altura que alcanza un bosque a una edad determinada o edad base. Esta última se determina cuando los incrementos corriente anual y medio anual en altura, se interceptan (Rivera, 1996). La altura de los árboles dominantes en el rodal se utiliza como indicador de productividad, ya que es independiente de la densidad del rodal y del manejo, siempre y cuando los aclareos y las podas no sean intensos (Zepeda y Rivero, 1984). De los tres métodos conocidos para determinar el índice de sitio, son de interés para este trabajo el de la curva guía y de la estimación del parámetro (Clutter *et al.*, 1983). Con la curva guía se obtienen curvas con diferentes interceptos con una misma pendiente por lo que la altura mantiene la misma proporción a diferentes edades, y produce curvas anamórficas. En contraste, con el de la estimación del parámetro la proporción que mantiene la altura es diferente entre las curvas y se obtienen curvas polimórficas (Torres, 2001). No existe un consenso sobre la superioridad de uno u otro tipo de curvas, dado que esto depende de la especie en cuestión (Hahn y Carmean, 1982) y de que las ventajas para un tipo de curva se traducen en desventajas para el otro y viceversa (Torres, 2001).

Moreno (Com. personal)¹ determinó el índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región de Cd. Hidalgo, Mich., mediante los métodos de la estimación del parámetro y la diferencia algebraica. El autor encontró que con el método de la estimación del parámetro, los modelos desarrollados mostraron un ajuste estadístico aceptable y una mayor fidelidad al diagrama de dispersión de los valores observados que aquéllos desarrollados con el método de la diferencia algebraica. Franco (Com. personal)² y Mares (Com. personal)³ determinaron el índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus herrerae* Martínez, respectivamente, en esa misma región. Con el método de la curva guía, Franco (*Op. cit.*) encontró que el mejor modelo fue el de Chapman-Richards. Por el contrario, Mares (*Op. cit.*) utilizó los métodos de la curva guía y estimación del parámetro y encontró que el modelo Chapman-Richards fue el que presentó el mejor ajuste para determinar el índice de sitio.

Dado que Moreno (*Op. cit.*) y Mares (*Op. cit.*) reportan la presencia de polimorfismo en los índices de sitio para *P. pseudostrobus* y *P. herrerae*, y que Franco (*Op. cit.*) sólo utilizó el método de la curva guía, además de que no se conoce si existe polimorfismo en *P. montezumae*, se hace necesario comparar los métodos de la curva guía y estimación del parámetro para *P. montezumae*, para elegir el más apropiado y estimar sus índices de sitio. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue comparar los métodos de la curva guía y estimación del parámetro en la determinación del índice de sitio para *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio está ubicada en la subprovincia fisiográfica de Mil Cumbres en Cd. Hidalgo, Mich. (Ucodefo-2, 1994). La región se ubica entre los 100° 28' y 100° 48' LW, y entre los 19° 20' y 19° 54' LN (CETENAL, 1977a) con altitudes que varían de 2100 a 3000 m y con pendientes de 5 a 40 %. El material geológico está representado por rocas ígneas extrusivas, donde prevalecen las reolitas de color verde que forman cuerpos compactos medianamente alterados (DETENAL, 1979). Los suelos predominantes son del tipo andosol, con textura media (CETENAL, 1977b). El clima es templado húmedo, con lluvias en verano y menos de 5% de lluvia invernal, y con el mes más caliente del año antes de junio (García, 1973). La vegetación está constituida por un bosque de pino-encino, además de diversas especies arbustivas y herbáceas (Martínez *et al.*, 1987).

Durante el periodo del 2 al 15 de diciembre de 2001 se derribaron 40 árboles dominantes en el área de estudio (28 resinados y 12 no resinados) para llevar a cabo el análisis troncal. La captura y procesamiento de datos se realizó mediante el programa Statistical Analysis System versión 6.12 (SAS, 1987) y el PROC NLIN. Con el método de la curva guía se probaron los modelos de crecimiento de Chapman-Richards, Gompertz, Logístico, Schumacher y Potencial para describir la relación altura = f (edad). La elección del modelo más apropiado se hizo con base en los siguientes criterios (Sit y Poulin-Costello, 1994): a) Valor más bajo del cuadrado medio del error (CME); b) Valor más alto del coeficiente de determinación (R^2); c) Análisis de los residuales estudentizados (R-student); y d) Criterio de convergencia.

Una vez elegido el modelo con el método de la curva guía, se estimó la curva de crecimiento en altura con la cual se calcularon los valores de incremento corriente y medio anual (ICA e IMA). Cuando los valores del ICA e IMA se interceptaron se determinó la edad base de 32 años de los índices de sitio (IS) (Zepeda y Rivero, 1984). La

¹ J Moreno Ch (1996) Comparación de dos métodos de construcción de curvas de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la región Hidalgo-Zinapécuaro de Michoacán. Tesis profesional. UACH. Chapingo, México.

² Rubén C Franco Avila. Ingeniero Agrónomo Forestal. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Mich.

³ Oscar Mares Arreola. Ingeniero Forestal. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coah.

equidistancia entre las curvas de IS se determinó con base en los límites de confianza a 95 % de los valores individuales, respecto a la curva guía y con referencia a los 32 años. Se utilizaron cinco clases de índice de sitio, cuya amplitud fue de 3.5 m (IS14, IS17.5, IS21, IS24.5 e IS28); amplitudes menores resultarían problemáticas al tratar de estimar la calidad de sitio (Zepeda y Rivero, 1984).

Con el método de estimación de parámetros descrito por Clutter *et al.* (1983) se utilizó el modelo de Chapman-Richards para generar curvas polimórficas de IS; este método estima la altura con base en el IS y la edad. Se consideró hacer el ajuste por árbol, ya que es más efectivo que hacer el ajuste por sitio. La ecuación reparametrizada para el ajuste por árbol, fue ajustada a la totalidad de los datos altura-edad-índice de sitio con el PROC NLIN y el método de ajuste Marquardt, y con análisis de los residuales estudentizados. La forma general de la ecuación reparametrizada del modelo de Chapman-Richards se presenta a continuación:

$$\text{Modelo original: } A = B_0 (1 - e^{-B_1 E})^{B_2}$$

$$\text{Modelo reparametrizado: } A = f_1 (1 - e^{-f_2 E})^{f_3}$$

Donde: A = altura; E = edad; e = base del logaritmo natural; $f_1 = B_1 + B_1 \text{ IS}$; $f_2 = B_2 + B_2 \text{ IS}$; $f_3 = B_3 + B_3 \text{ IS}$; y IS = índice de sitio.

La deficiencia más notable del modelo es que las alturas estimadas no coinciden con el valor del índice de sitio a la edad base (Carmean, 1972). Para corregir este desajuste, se utilizó el procedimiento propuesto por Carmean (1972), que implica el cálculo de un factor de corrección que es igual al cociente del valor del índice de sitio dividido entre el valor estimado con el modelo (coeficiente de proporcionalidad). Dado que cada curva presenta desviaciones respecto del valor deseado, se calculó un factor para cada una. Por último, con los factores calculados se corrigieron las alturas estimadas con el modelo para cada índice de sitio. Dado que se estimó una edad base para cada árbol y no se contaba con una edad base estandarizada para todos los individuos analizados, se obtuvo el promedio de dichas edades, el cual fue de 35 años. La equidistancia entre las curvas de IS se estableció al considerar el intervalo de 12 a 32.5 m, valores de altura observados a la edad base de 35 años. La equidistancia entre curvas de IS fue de 4 m, por lo que se obtuvieron cinco clases de IS (IS13, IS17, IS21, IS25 e IS29). Los valores del ICA y del IMA también se determinaron para dichas curvas de IS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar el método de la curva guía, el modelo con mejor ajuste a los valores edad-altura fue el de Gompertz, dado que obtuvo el valor más alto del coeficiente de determinación (R^2) (Figura 1) y el menor valor del cuadrado medio del error (CME=11.146); además, los residuales estudentizados presentaron una buena distribución y ocurrió convergencia. Las curvas anamórficas de IS, determinadas con este método, se caracterizaron por: presentar interceptos diferentes (IS₁₄ = 1.27, IS_{17.5} = 1.58, IS₂₁ = 1.90, IS_{24.5} = 2.22 e IS₂₈ = 2.54 m); tener asíntotas aproximadamente a la misma edad, entre 40 y 50 años; y formar curvas paralelas equidistantes, por lo que el ritmo de crecimiento es constante en los diferentes sitios (Figura 1).

Asimismo, los valores más altos del ICA y del IMA de las curvas de IS (ICA=0.55, 0.69, 0.82, 0.96 y 1.10 m; IMA=0.44, 0.55, 0.66, 0.77 y 0.87 m) ocurrieron a la misma edad, 20 y 32 años, en ese orden.

En este estudio, al emplear el método de la curva guía se obtuvieron fácilmente las curvas anamórficas de IS, dada la sencillez del manejo algebraico del modelo al momento de desarrollarlas por arriba y por abajo de la curva promedio; esto ha sido reportado en un estudio sobre la curva guía por Zepeda y Rivero (1984) y en la comparación de tres métodos efectuada por Guerra *et al.* (1991) para determinar el índice de sitio para *P. engelmannii* Carr. en El Salto, Dgo. El método de la curva guía supone que ocurre una misma tasa de crecimiento en todos los sitios del bosque, de manera que dichas tasas son proporcionales en los diferentes sitios; esto contradice a la realidad de que en los bosques ocurren tantas formas de curvas como combinaciones de arbolado y condiciones ambientales existan (Beck, 1971), por lo que es necesario emplear métodos polimórficos para mejorar las estimaciones de los IS (Hahn y Carmean, 1982).

Con el método de la estimación de parámetros, el modelo de Chapman-Richards mostró un buen ajuste al dar un alto valor de R^2 (Figura 2) y un bajo valor del CME=10.186; asimismo, los residuales estudentizados presentaron una buena distribución. Los valores del R^2 y del CME fueron mejores con este método que con el de la curva guía. Las curvas polimórficas de IS determinadas con la estimación del parámetro presentaron interceptos similares (IS₁₃ = 1.50, IS₁₇ = 1.60, IS₂₁ = 1.61, IS₂₅ = 1.56 y IS₂₉ = 1.47 m) con asíntotas ascendentes conforme se incrementa el IS, lo cual guarda correspondencia con el hecho de que árboles en los sitios ricos (IS₂₉) alcanzan más pronto sus tamaños comerciales que aquéllos que crecen en sitios pobres (IS₁₃) (Furnival *et al.*, 1990). Además, no todos los valores más altos del ICA y del IMA

coincidieron a la misma edad, como en el caso del método de la curva guía. Los valores más altos del ICA para los IS más pobres (IS₁₃=0.46 m; IS₁₇=0.60 m) y medio (IS₂₁=0.73 m) se encontraron a los 15 años de edad; en comparación, los valores más altos del ICA en los dos mejores IS (IS₂₅=0.88 m; IS₂₉=1.04 m) ocurrieron a los 20 años. Similarmente, los valores del IMA tampoco coincidieron a la misma edad con el método de la estimación del parámetro, ya que para los sitios más pobres (IS₁₃=0.41

m) ocurrió a los 20 años de edad mientras que para los sitios más ricos o mejores los valores del IMA (IS₂₅=0.72 m; IS₂₉=0.83 m) coincidieron a los 30 años. Todo lo anterior es una evidencia de la presencia de polimorfismo en las curvas de crecimiento en altura de *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

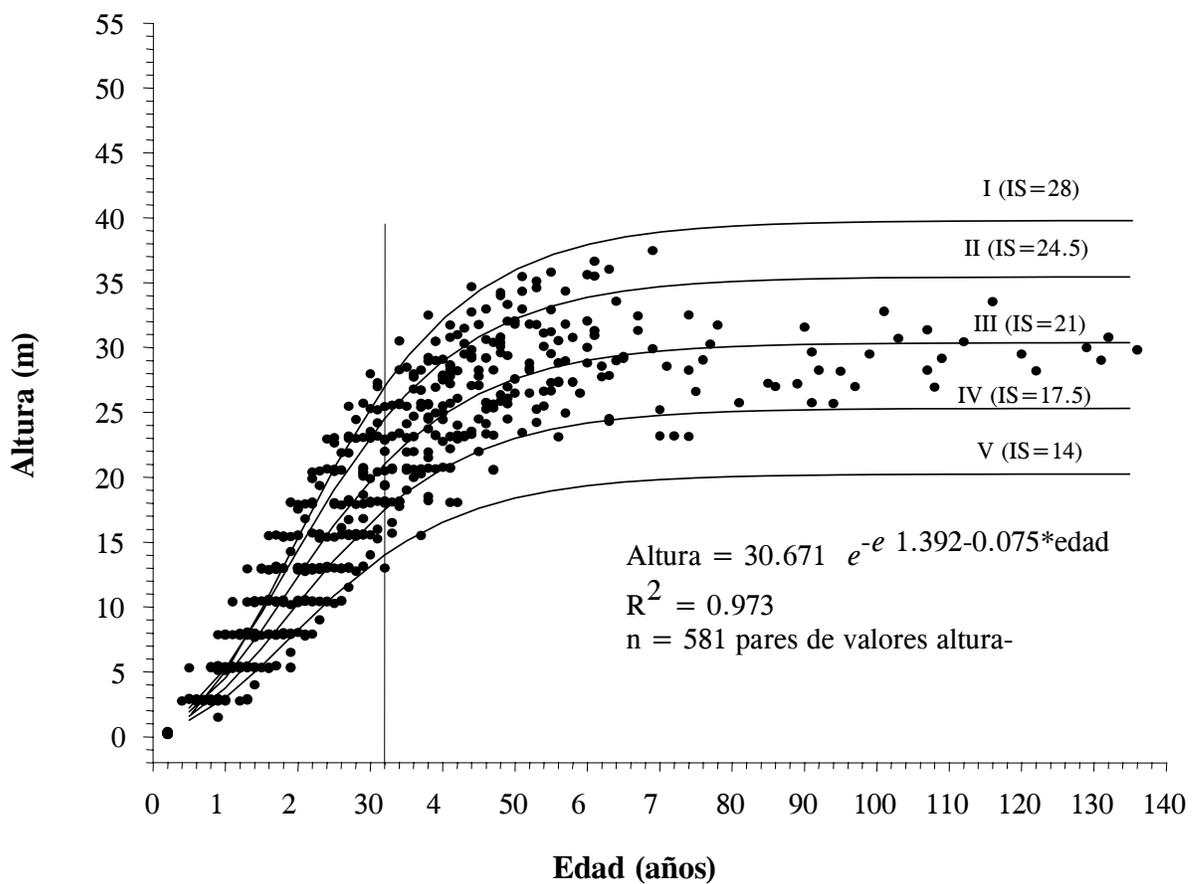


Figura 1. Curvas anamórficas para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Mich., con edad base de 32 años, determinadas por el método de la curva guía.

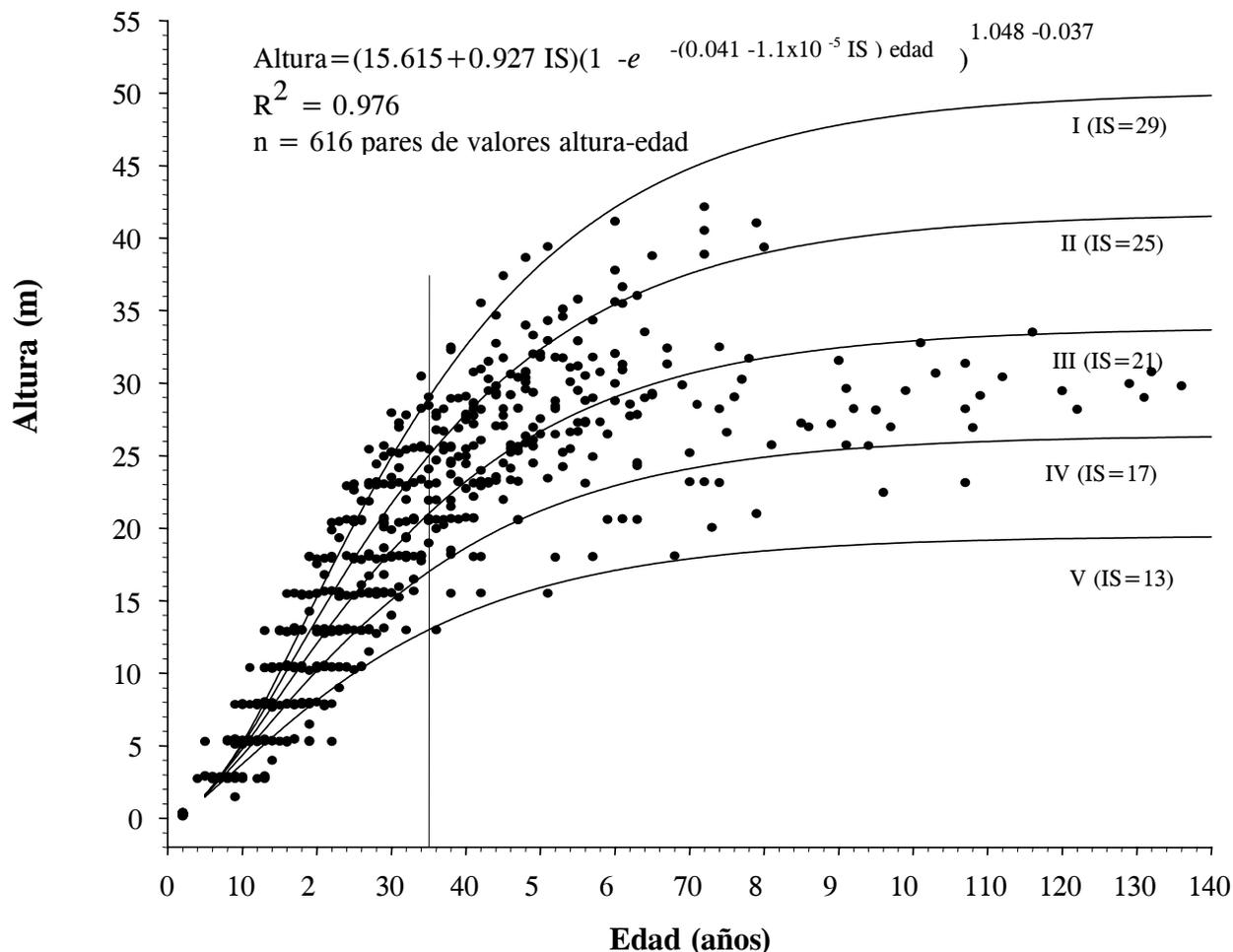


Figura 2. Curvas polimórficas para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Mich., con una edad base de 35 años, determinadas por el método de la estimación del parámetro.

En este trabajo, el método de la estimación del parámetro permitió obtener curvas polimórficas de IS las cuales se caracterizaron por: a) La altura, a la edad base, es igual al IS; b) La altura de la asíntota se incrementa con el IS; y c) A una edad cero corresponde una altura cero (Figura 2). Lo anterior coincide con lo reportado por Borders *et al.* (1984) al determinar el índice de sitio en plantaciones de *P. elliotii* en el sureste de EE.UU. Similarmente, diversos autores (Payandeh y Wang, 1994; Madrigal y Ramírez,

1995) han reportado el uso de curvas polimórficas para determinar el IS en diferentes especies de coníferas y en condiciones ambientales diversas, lo cual concuerda con el polimorfismo de las curvas de crecimiento en altura encontrado en este estudio en *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Recientemente se han propuesto modelos que integren tanto el componente anamórfico como el polimórfico con

la intención de mejorar la estimación del IS; dicho modelo se llaman ana-polimórficos, poli-anamórficos o compuestos, y son competitivos con respecto a los tradicionales anamórficos o polimórficos que tengan el mismo número de parámetros; sin embargo las diferencias en R² no son superiores a 10 % del mejor ajuste (Torres, 2001). A pesar de la controversia para la elección entre curvas anamórficas, polimórficas e integrales o compuestas, en este estudio es evidente el polimorfismo de las curvas de crecimiento en altura para *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich., lo que coincide con lo reportado para *P. pseudostrubus* y *P. herrerae* en esa misma región (Moreno y Mares, Com. personal, *Op. cit.*). Por lo anterior, la estimación del índice de sitio en este estudio es aplicable para clasificar los bosques de *P. montezumae* con base en las cinco clases determinadas con el método de la estimación del parámetro (Cuadro 1), ya que dichas curvas polimórficas cubren ampliamente las condiciones ambientales en donde se distribuye *P. montezumae*. Con el propósito de poner en práctica la clasificación de la productividad es necesario hacer una validación en campo de los índices de sitios reportados en este trabajo.

CONCLUSIONES

El método de la predicción del parámetro fue mejor que el método de la curva guía en la determinación del índice de sitio para *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich. Asimismo, el método de la predicción del parámetro permitió ajustar, con mayor confiabilidad y fidelidad, curvas polimórficas a los diferentes sitios que representan a su vez las diversas condiciones ambientales en donde se distribuye y crece *P. montezumae* en esa región. Finalmente, los índices de sitio determinados con el método de la estimación del parámetro se deben usar para la clasificación de los bosques de *P. montezumae* en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Cuadro 1. Altura promedio de los árboles de *Pinus montezumae* Lamb. a diferentes edades en diferentes índices de sitio en la región de Cd. Hidalgo, Mich.

Edad (años)	Índice de sitio (m)				
	13	17	21	25	29
			Altura (m)		
10	3.75	4.35	4.77	5.05	5.21
20	8.14	10.19	12.04	13.72	15.24
30	11.63	15.05	18.40	21.68	24.89
40	14.15	18.65	23.22	27.86	32.57
50	15.91	21.19	26.66	32.33	38.19
60	17.10	22.93	29.04	35.43	42.12
70	17.90	24.10	30.65	37.54	44.80
80	18.44	24.89	31.73	38.96	46.60
90	18.79	25.41	32.44	39.90	47.80
100	19.03	25.75	32.91	40.52	48.59
110	19.18	25.98	33.23	40.93	49.11
120	19.29	26.13	33.43	41.20	49.45
130	19.35	26.23	33.57	41.38	49.68
140	19.40	26.30	33.66	41.50	49.83

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y a la Asociación de Permisionarios Forestales del Oriente de Michoacán, A. C., Cd. Hidalgo, Mich., por el apoyo otorgado al proyecto de investigación institucional de la UAAAN 02.03.0207.2364 del cual formó parte el presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Beck D E (1971) Height-growth patterns and site index of white pine in the Southern Appalachians. *For. Sci.* 17(2):253-261.

Borders B E, R L Bailey, K D Ware (1984) Slash pine site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic differences method. *For. Sci.* 30 (2):411-423.

Carmean W H (1972) Site index curves for upland oaks in the Central States. *For. Sci.* 18(2):109-120.

CETENAL (1977a) Cartas Topográficas. E14A24 (Tzitzio), E14A15 (Maravatío), E14A25 (Ciudad Hidalgo) Escala 1:50,000. México.

CETENAL (1977b) Cartas Edafológicas. E14A24 (Tzitzio), E14A15 (Maravatío), E14A25 (Ciudad Hidalgo) Escala 1:50,000. México.

Clutter J L, J C Forston, L V Pienar, G H Brister (1983) Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley & Sons. USA. 410 p.

Daniel T W, J A Helms, F S Baker (1982) Principios de Silvicultura. McGraw-Hill. México. 493 p.

DETENAL (1979) Cartas Geológicas. E14A24 (Tzitzio), E14A15 (Maravatío), E14A25 (Ciudad Hidalgo) Escala 1:50,000. México.

Furnival G M, T G Gregoire, H T Valentine (1990) An analysis of three methods for fitting site-index curves. *For. Sci.* 36(2):464-469.

García E (1973) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. 246 p.

Guerra L G, C Aguirre B, F Zamudio S (1991) Análisis de algunas estrategias para la estimación del índice de sitio en rodales puros-coetáneos de *Pinus engelmannii* Carr. *Rev. Chapingo* XV(75):162-166.

Hahn J T, W H Carmean (1982) Lake states site index curves formulated. USDA-SF. Gen. Tech. Rep. NC-88. 5 p.

Madrigal H S, H Ramírez M (1995) Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índice de sitio en Michoacán. *Ciencia For.* 20(78):35-57.

Martínez M E, C G Ibarra, V A Hernández, F Lorea-Hernández (1987) Contribución al conocimiento de la flora y vegetación de la región de los Azufres, Michoacán. *Rev. Trace* 12:22-37.

Payandeh B, Y Wang (1994) A site index model remodified. *Can. J. For. Res.* 24:197-198.

Rivera M C (1996) Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Huayacocotla, estado de Veracruz. *Ciencia For.* 21(80): 57-78.

SAS Institute Inc (1987) SAS/STAT™ Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. Cary, NC. U.S.A. 1028 p.

SEMARNAP (1999) Anuario Estadístico de la Producción Forestal 1997. México. 139 p.

Sit V, M Poulin-Costello (1994) Catalog of curves for curve fitting. Biometrics Information Handbook Series. Ministry of Forests. No. 4. Victoria, B. C. Canada. 110 p.

Torres R J M (2001) Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. *Agrociencia* 35(1):87-98.

Ucodefo-2 (Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 2)
(1994) Organización de la Unidad Ciclo 1994-1995. Cd. Hidalgo, Michoacán. 21 p.

Zepeda B E M, P Rivero B (1984) Construcción de curvas anamórficas de índices de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. Ciencia For. 9(51):3-38.