

ÍNDICE DE SITIO PARA PLANTACIONES DE *Pinus greggii* Engelm. EN METZTITLÁN, HIDALGO, MÉXICO

SITE INDEX FOR *Pinus greggii* Engelm. PLANTATIONS IN METZTITLÁN, HIDALGO, MEXICO

Jonathan Hernández-Ramos¹; J. Jesús García-Magaña²;
Edgar H. Olvera-Delgadillo³; Juan C. Velarde-Ramírez⁴;
Xavier García-Cuevas¹; H. Jesús Muñoz-Flores⁵.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP),
Campo Experimental Chetumal. Carretera Chetumal-Bacalar km 25. C. P. 77000.
Chetumal, Quintana Roo, MÉXICO.

Correo-e: forestjonathanhdez@gmail.com; hernandez.jonathan@inifap.gob.mx
Tel.: (983) 83 20 167 (Autor para correspondencia).

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Facultad de Agrobiología.
Paseo de la Revolución núm. 1, col. Emiliano Zapata. C. P. 60080. Uruapan, Michoacán, MÉXICO.

³Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Av. 4 esquina con Av. 11 s/n, col. Plutarco Elías Calles.
C. P. 42035. Pachuca de Soto, Hidalgo, MÉXICO.

⁴Asesoría Técnica Forestal (ATF). Calle Aluminio núm. 88, col. Ampliación Revolución. C. P. 60153.
Uruapan, Michoacán, MÉXICO.

⁵INIFAP. Río Duero núm. 3, col. Manantiales. C. P. 60053. Uruapan, Michoacán, MÉXICO.

RESUMEN

Los índices de productividad son esenciales en la planeación del manejo forestal sustentable. El índice de sitio es la metodología más utilizada en la clasificación de la calidad de las áreas forestales. Sin embargo, la mayoría de los macizos forestales y plantaciones no cuentan con tal información que apoye la planeación de las actividades silvícolas. Por ello, el objetivo fue estimar el índice de sitio de las plantaciones forestales de *Pinus greggii* Engelm., establecidas en la parte serrana del municipio de Metztlán, Hidalgo. Los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull se ajustaron con 233 observaciones de edad-altura provenientes de un análisis troncal. De acuerdo con el valor más bajo del cuadrado medio del error, el valor más alto de R^2 y la distribución de residuales, se seleccionó el modelo de Schumacher para la construcción de la curva guía y el sistema de curvas anamórficas y polimórficas. Se establecieron cinco etiquetas de índice de sitio para las alturas 12, 14, 16, 18 y 20 m con calidades de estación V, IV, III, II y I, respectivamente. Se obtuvo buena estimación del crecimiento de la altura dominante en función de la edad, ya que considera todas las condiciones existentes dentro de las plantaciones.

ABSTRACT

Productivity indices are essential to sustainable forest management planning. Site Index is the primary method used to classify the quality of forest sites. However, this information is not available to aid in the planning of silvicultural interventions for most forest stands and plantations. Therefore, the objective was to estimate the site index for forest plantations of *Pinus greggii* Engelm., which were already established in the mountainous region of the municipality of Metztlán, Hidalgo. Schumacher, Chapman-Richards and Weibull functions were fitted to 233 age-height data pairs obtained from stem analysis. Based on the lowest value of the mean square error, the highest R^2 value and the distribution of residuals, the Schumacher model was selected for the construction of the guide curve and the families of anamorphic and polymorphic curves. Five site index labels were established for heights of 12, 14, 16, 18 and 20 m with site qualities of V, IV, III, II and I, respectively. A good representation of dominant height growth as a function of age was achieved given that all conditions existing within the plantations were considered in the models.

PALABRAS CLAVE: Calidad de estación, Schumacher, crecimiento, altura dominante, curva guía.

KEYWORDS: Site quality, Schumacher model, growth, dominant height, guide curve.



Recibido: 10 de abril, 2013
Aceptado: 20 de marzo, 2014
doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.04.016
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

La clasificación de áreas forestales, de acuerdo con su productividad, es indispensable en la planeación del manejo sostenible de los recursos forestales. El índice de sitio (IS) es el indicador más utilizado como medida de productividad forestal, por representar la máxima capacidad de cosecha de madera de un bosque en un tiempo determinado (Álvarez, Barrio, Diéguez, & Rojo, 2004; Cornejo, Pereyra, Mares, Valencia, & Celestino, 2005; Madrigal, Moreno, & Vázquez, 2005; Torres, 2001). En la estimación de la productividad de las áreas se pueden considerar factores intrínsecos

(interacción de variables de la masa con la edad) o factores extrínsecos (clima, suelo y vegetación). Los primeros son, a través de la altura dominante, los más adecuados para el cálculo del IS, debido a la baja afectación por la densidad o los tratamientos silvícolas aplicados (Álvarez et al., 2004; De los Santos-Posadas, Montero-Mata, & Kanninen, 2006). Las metodologías para el cálculo del IS han evolucionado en los últimos años; antes se utilizaban modelos de crecimiento lineales simples ahora se emplean modelos exponenciales complejos (Rodríguez-Acosta & Arteaga-Martínez, 2005), y las familias de curvas anamórficas y polimórficas que se utilizaban individualmente ahora se han integrado para mejorar la calidad de las estimaciones de crecimiento (Torres, 2001).

En la búsqueda de una producción forestal sustentable se han ocasionado cambios importantes en las prácticas de manejo forestal (Madrigal et al., 2005) y se ha fomentado el establecimiento de plantaciones. Por ello, es inminente la necesidad de incorporar herramientas silvícolas confiables que permitan al administrador forestal tomar decisiones que orienten el manejo y aprovechamiento a la sustentabilidad. Actualmente, la falta de información sobre el potencial productivo de los terrenos forestales del estado de Hidalgo y las pocas herramientas silvícolas para cada una de las especies bajo aprovechamiento han ocasionado la sobreexplotación, el mal manejo y el deterioro de los recursos forestales debido a la mala planeación de las actividades silvícolas en los programas de manejo forestal (PMF). De igual forma, lo anterior provoca que las plantaciones forestales no alcancen el máximo rendimiento maderable y, por consiguiente, la tasa de retorno de la inversión se prolongue.

Debido a la importancia del cálculo del IS para la planeación de las actividades de aprovechamiento forestal, en el afán de un manejo sustentable de los recursos, se planteó el objetivo de estimar el IS para plantaciones forestales de *Pinus greggii* Engelm., establecidas en la parte serrana del municipio de Metztlán, Hidalgo. Los resultados de este trabajo formarán parte de las herramientas de planeación para los administradores forestales en las actividades de aprovechamiento, manejo y extracción de los recursos maderables en la región.

INTRODUCTION

The classification of forest areas according to their productivity is essential in planning the sustainable management of forest resources. Site index (SI) is the most commonly measure used for forest productivity since it represents the maximum harvest capacity of a forest over a specified period of time (Álvarez, Barrio, Diéguez, & Rojo, 2004; Cornejo, Pereyra, Mares, Valencia, & Celestino, 2005; Madrigal, Moreno, & Vázquez, 2005; Torres, 2001). Both intrinsic factors (interaction of stand variables with age) and extrinsic factors (climate, soil and vegetation) can be considered when estimating the productivity of forest areas. The use of dominant height, a key intrinsic factor, is one of the best methods for calculating site index as it is little affected by stand density or silvicultural interventions (Álvarez et al., 2004; De los Santos-Posadas, Montero-Mata, & Kanninen, 2006). In recent years methods for calculating SI have evolved with the use of simple linear growth models being replaced by complex exponential models (Rodríguez-Acosta & Arteaga-Martínez, 2005), and the use of families of anamorphic and polymorphic curves that were used individually now being integrated in order to improve the quality of growth estimates (Torres, 2001).

In the effort to make forest production more sustainable important changes have been made to forest management practices (Madrigal et al., 2005) and the establishment of plantations has been encouraged. Therefore, there is an immediate need for the incorporation of reliable silvicultural tools that will allow forest managers to make decisions that will guide forest management and exploitation toward sustainability. Currently, the lack of information on the productive potential of forest lands in the state of Hidalgo and the few silvicultural tools for each of the species under harvest have led to overexploitation, mismanagement and deterioration of forest resources due to poor planning of forestry activities in forest management programs (FMP). In the same way, the foregoing results in forest plantations that do not achieve maximum timber yield and, therefore, the time to return on investment is prolonged.

Due to the importance of calculating site index in order to plan forest harvesting activities as part of the sustainable management of resources, we set out to estimate site index for already established forest plantations of *Pinus greggii* Engelm., in the mountainous part of the municipality of Metztlán, Hidalgo. The results of this study will constitute an addition to the planning tools available to forest managers involved in harvesting, management and extraction of timber resources in the region.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study area is located in the ejido of Fontezuelas, municipality of Metztlán, Hidalgo, at an altitude of between

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el ejido de Fontezuelas, municipio de Metztlán, Hidalgo, a una altitud que oscila entre los 2,000 y 2,500 m. El clima es tipo semiseco (de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García [1988]) con clave climática BS₁ Kw₁ y los suelos son de tipo Feozem háplico y Regosol eútrico (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática [INEGI], 1992).

Se colectaron 25 árboles de plantaciones de *P. greggii* provenientes de 65 ha, los cuales se sometieron a un análisis troncal; se seleccionaron árboles dominantes, distribuidos en todas las condiciones de crecimiento de la especie. Los datos obtenidos se ordenaron por categoría de edad.

La información se procesó con el paquete estadístico SAS 9.0 (Statistical Analysis System [SAS], 1992) y se probaron los modelos de crecimiento de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull para ajustar una ecuación no lineal con el fin de predecir la altura dominante en función de la edad. El modelo de mejor ajuste se seleccionó considerando el valor más bajo del cuadrado medio del error (CME), el valor máximo del coeficiente de determinación (R²) y la distribución de residuales.

Modelo de crecimiento de Schumacher: $H = B_1 e^{-B_2 E^i}$

Modelo de crecimiento de Chapman-Richards:

$$H = B_1 \left[1 - e^{-\beta_1 E} \right]^{\beta_2}$$

Modelo de crecimiento de Weibull: $H = \beta_1 \left[1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}} \right]$

Donde:

H = Altura dominante (m).

A = Edad (años).

β'_s = Parámetros de estimación.

Para verificar el cumplimiento de los supuestos de la regresión, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk (P = 0.05). Además, las frecuencias relativas y acumuladas de los residuos se representaron gráficamente y se localizaron las formas para parecerse a una línea recta con respecto a la probabilidad de una distribución normal y las parcelas de sus porcentajes se localizaron para parecerse a una curva de Gauss (SAS, 1992).

Para el desarrollo de la familia de curvas de crecimiento en altura se llevó a cabo según la metodología de la curva guía, que consistió en ajustar los datos para los tres modelos de crecimiento y armonizar la curva con la edad de referencia (Barreto-Medel, Frederic, Nepveu, y Álvarez-Lazo, 2011; Crechi, Fassola, Keller, y Barth, 2011; García, Flores, y Benavides, 2007; Jerez-Rico, Moret-Barillas, y Carrero-Gómez, 2011; Montero y Kanninen, 2003).

En el Cuadro 1 se muestran los tres modelos de crecimiento (Schumacher, Chapman-Richards y Weibull) utilizados para

2,000 and 2,500 m. The climate is semi-dry (according to the Köppen classification modified by García [1988]) with climate type BS₁ Kw₁ and Haplic Phaeozem and Regosol eutric soils (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática [INEGI], 1992).

Stem analysis was conducted on a total of 25 trees of *P. greggii* with an age range of three to 28 years, found in plantations covering 65 ha. Trees selected were all dominant trees that were distributed across all growth conditions where the species is found.

Data were ordered by age class and analyses were conducted using the SAS 9.0 statistical package (Statistical Analysis System [SAS], 1992) in order to fit a nonlinear equation predicting dominant height as a function of age. Growth models tested included Schumacher, Chapman-Richards and Weibull models. The model which best fit the data was selected by considering the lowest mean square error (MSE), the maximum value of the coefficient of determination (R²) and the distribution of residuals.

Schumacher Growth Model: $H = B_1 e^{-B_2 E^i}$

Chapman-Richards Growth Model: $H = B_1 \left[1 - e^{-\beta_1 E} \right]^{\beta_2}$

Weibull Growth Model: $H = \beta_1 \left[1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}} \right]$

Where:

H = Dominant Height (m).

A = Age (years).

β'_s = Parameters to be estimated.

In order to verify that the assumptions of the regression were met we performed the Shapiro-Wilk test (P = 0.05). Additionally, the relative and cumulative frequencies of the residuals were plotted and the shapes were found to resemble a straight line with respect to the probability of a normal distribution and plots of their percentages were found to resemble a Gauss curve (SAS, 1992).

In order to develop the family of height growth curves the guide curve methodology was followed, which consisted of fitting the data to the three growth models and harmonizing the curve to reference age (Barreto-Medel, Frederic, Nepveu, & Álvarez-Lazo, 2011; Crechi, Fassola, Keller, & Barth, 2011; García, Flores, & Benavides, 2007; Jerez-Rico, Moret-Barillas, & Carrero-Gamez, 2011; Montero & Kanninen, 2003).

Table 1 shows the three growth models used for the calculation of the site index dominant height, the family of curves and rating of site index in its anamorphic and polymorphic forms. The families of anamorphic and polymorphic curves were constructed by removing the scale or form parameters from the equation generated, since these determine the type of families of curves. For the anamorphic curves, the asymptotic parameter was removed from

CUADRO 1. Modelos de crecimiento para el cálculo de altura dominante, índice de sitio (IS), familias de curvas y calificación de IS en plantaciones de *Pinus greggii* en Metztlitlán, Hidalgo.

TABLE 1. Dominant height growth equations, site index, families of curves and site index classification in *Pinus greggii* plantations in Metztlitlán, Hidalgo.

Modelo / Model	Ecuación integral / Integral equation	IS / SI	Familia de curvas / Family of curves	Calificación de IS / SI rate
Schumacher (anamórfica / anamorphic)	$H = B_1 e^{-B_2 E^1}$	$IS = B_1 e^{-B_2 E^1}$ $SI = B_1 e^{-B_2 E^1}$	$H = IS e^{-B_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$	$IS = H e^{-B_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$ $SI = H e^{-B_2 (E_0^{-1} - E^{-1})}$
Schumacher (polimórfica / polymorphic)	$H = B_1 e^{-B_2 E^1}$	$IS = B_1 e^{-B_2 E^1}$ $SI = B_1 e^{-B_2 E^1}$	$H = \beta_1 \left(\frac{IS}{\beta_1} \right)^{\frac{E_0}{E}}$	$IS = \beta_1 \left(\frac{H}{\beta_1} \right)^{\frac{E}{E_0}}$ $SI = \beta_1 \left(\frac{H}{\beta_1} \right)^{\frac{E}{E_0}}$
Chapman-Richards (anamórfica / anamorphic)	$H = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$ $SI = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$	$H = \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E}}{1 - e^{-\beta_2 E_0}} \right]^{\beta_3}$	$IS = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0}}{1 - e^{-\beta_2 E}} \right]^{\beta_3}$ $SI = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0}}{1 - e^{-\beta_2 E}} \right]^{\beta_3}$
Chapman-Richards (polimórfica / polymorphic)	$H = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$ $SI = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\left(\frac{\text{Ln}(IS/\beta_3)}{\text{Ln}(1 - e^{(-\beta_2 E_0)})} \right)}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\left(\frac{\text{Ln}(H/\beta_3)}{\text{Ln}(1 - e^{(-\beta_2 E)})} \right)}$ $SI = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\left(\frac{\text{Ln}(H/\beta_3)}{\text{Ln}(1 - e^{(-\beta_2 E)})} \right)}$
Weibull (anamórfica / anamorphic)	$H = B_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}]$ $SI = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}]$	$H = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}}{1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}} \right]$	$IS = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}}{1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}} \right]$ $SI = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}}{1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}} \right]$
Weibull (polimórfica / polymorphic)	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E^{\beta_3}}]$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}]$ $SI = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0^{\beta_3}}]$	$H = \beta_1 \left[1 - e^{\left(\frac{E}{E_0} \right) \text{Ln} \left(\frac{IS}{\beta_1} \right)} \right]$	$IS = \beta_1 \left[1 - e^{\left(\frac{E_0}{E} \right) \text{Ln} \left(\frac{H}{\beta_1} \right)} \right]$ $SI = \beta_1 \left[1 - e^{\left(\frac{E_0}{E} \right) \text{Ln} \left(\frac{H}{\beta_1} \right)} \right]$

H: Altura dominante, E_0 : Edad base (30 años), β_3 : Parámetros de estimación, E: Edad (años)
 H: Dominant height, E_0 : Base age (30 years), β_3 : Estimated parameters, E: Age (years)

el cálculo de la altura dominante del IS, familia de curvas y calificación de IS en sus formas anamórficas y polimórficas. Las familias de curvas anamórficas y polimórficas se construyeron despejando los parámetros de escala o de forma de la ecuación generada, ya que éstos determinan el tipo de familias de curvas. Para las curvas anamórficas, el parámetro asintótico se despejó de la ecuación de IS y se sustituyó en la ecuación original, considerando el valor asintótico implícito y los parámetros de forma comunes. Las curvas se generaron variando la edad y el IS, y manteniendo constante la edad base (Andenmatten & Letourneau, 2000; García, Parraguirre, & Rodríguez, 1992; Mares, Cornejo, Valencia, & Flores, 2004; Sánchez & Castillo, 2001). Para graficar la familia de curvas polimórficas y calificar el IS de las plantaciones, se despejó β_1 (parámetro dependiente del sitio) para obtener las expresiones del Cuadro 1. En este caso se consideró que el valor asintótico es constante para todos los sitios y lo que varió fue la velocidad de crecimiento.

the site index equation and substituted in the original equation, considering the implicit asymptotic value and the common form parameters. The curves were generated by varying age and site index, and keeping constant the base age (Andenmatten & Letourneau, 2000; García, Parraguirre, & Rodríguez, 1992; Mares, Cornejo, Valencia, & Flores, 2004; Sánchez & Castillo, 2001). To graph the family of polymorphic curves, β_1 (site dependent parameters) was removed to obtain the expressions in Table 1. In this case the asymptotic value was considered to be constant for all sites and what varied was the growth rate.

RESULTS AND DISCUSSION

As a result of the core analysis, 233 data pairs of dominant height and age of 25 dominant trees of *P. greggii* were obtained, where the mass ages ranged from 3 to 28 years. Figure 1 shows a graphical representation of such information.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del análisis troncal, se obtuvieron 233 pares de datos de altura dominante y edad de 25 árboles dominantes de *P. greggii*, en donde las edades en la masa fluctuaron de 3 a 28 años. En la Figura 1 se muestra la representación gráfica de tal información.

Como resultado del análisis de varianza de los tres modelos utilizados, en el Cuadro 2 se observan los estadísticos de ajuste y los parámetros estimados para los datos de edad-altura dominante de *P. greggii*.

Comparando la bondad de ajuste de los modelos utilizados, la ecuación de Schumacher resultó ser la mejor de acuerdo con los valores del CME, R² y la distribución de residuales. Al verificar el cumplimiento de los supuestos de regresión con la prueba de Shapiro-Wilk, se obtuvo que hay normalidad de los errores en el modelo (W = 0.985466). Además, los residuales se comportaron como una línea recta respecto de la distribución normal y los porcentajes se asemejaron a una campana de Gauss (Figura 2).

La ecuación de Shumacher quedó de la siguiente manera:

$$H = 24.7233e^{-13.5144E^{-1}}$$

Definiendo la edad base en 30 años (E₀), se obtuvo la siguiente expresión para el cálculo del índice de sitio (IS):

$$IS = 24.7233 e^{-13.5144E_0^{-1}}$$

Fit statistics and parameter estimates from analysis of variance of the three growth models utilized with the age-height data for *P. greggii* are shown in Table 2.

Comparing the goodness of fit of the models used, the Schumacher equation proved to be the best based on the values of mean square error, R² and the distribution of residuals. Verification of the fulfillment of the assumptions of regression using the Shapiro-Wilk test indicated that there are normal errors in the model (W: normal = 0.985466). In addition, the residuals behaved as a straight line with respect to the normal distribution and percentages were similar to a Gauss bell-curve (Figure 2).

The equation obtained was as follows:

$$H = 24.7233e^{-13.5144E^{-1}}$$

Defining the base age as 30 years (E₀), the following expression for site index was obtained (SI):

$$SI = 24.7233 e^{-13.5144E_0^{-1}}$$

Using the base age and trend of the guide curve defined by the previous equation, we decided to use five site index labels corresponding to the 12, 14, 16, 18 and 20 m height classes. Families of anamorphic and polymorphic curves were constructed by substituting the respective values in the equation as shown below:

Anamorphic form: $H = ISe^{-13.5144(30 - E^{-1})}$
 Polymorphic form: $H = 24.7233 \left(\frac{IS}{24.7233} \right)^{\frac{30}{E}}$

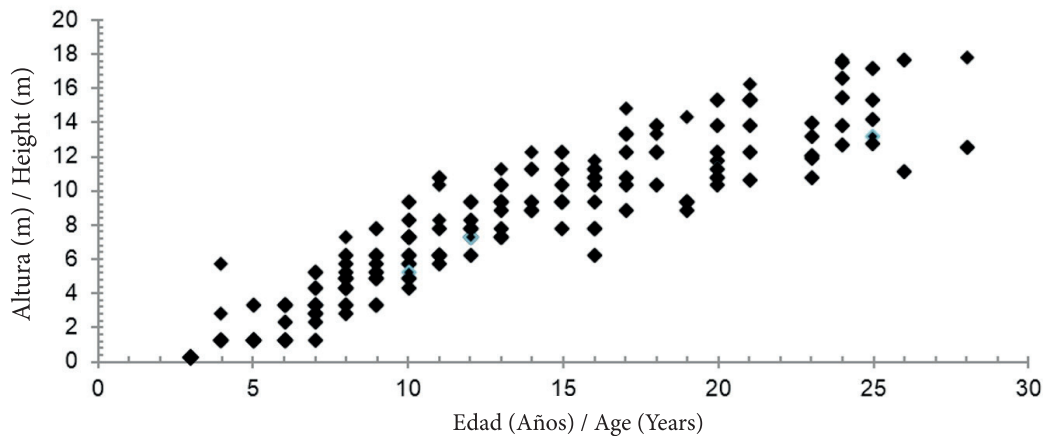


FIGURA 1. Representación gráfica de los valores de edad-altura de 25 árboles de *Pinus greggii* en el ejido Fontezuelas, municipio de Metztlán, Hidalgo.

FIGURE 1. Graphical representation of the age-height values of 25 dominant *P. greggii* trees in the ejido Fontezuelas, municipality of Metztlán, Hidalgo.

CUADRO 2. Resumen del análisis de varianza para ecuaciones de crecimiento en altura dominante en plantaciones de *Pinus greggii* en el ejido Fontezuelas, Metztlán, Hidalgo.

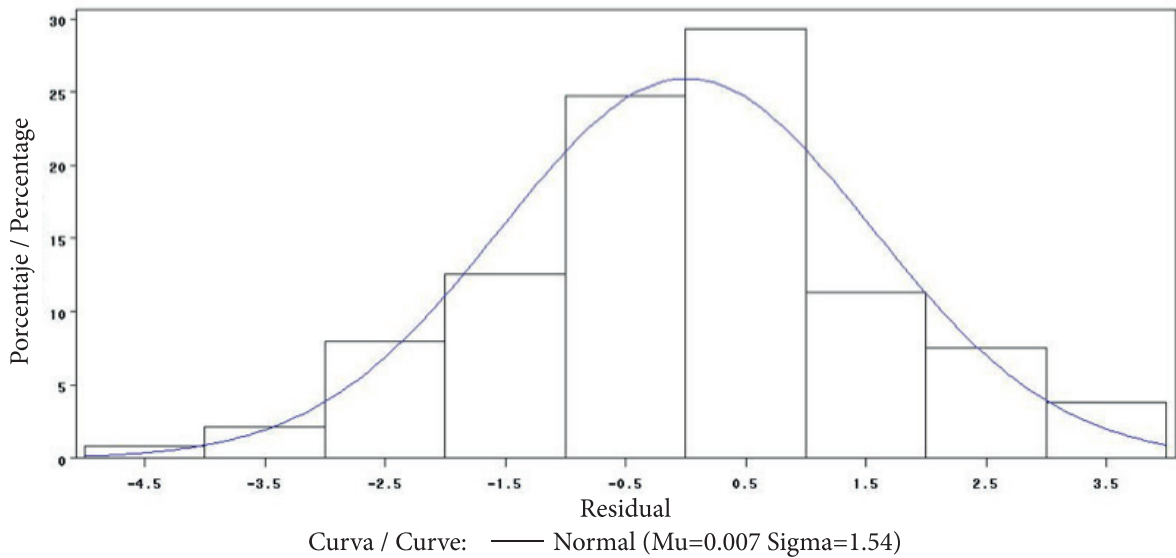
TABLE 2. Summary of analysis of variance for the equations for dominant height growth in *P. greggii* plantations in the ejido of Fontezuelas, municipality of Metztlán, Hidalgo.

Modelo de crecimiento / Growth model	R ²	CME / MSE	β_1	β_2	β_3
Schumacher	0.9687	2.2552	24.7233	-13.5144	---
Chapman-Richards	0.9684	2.2848	16.0994	0.1264	2.8440
Weibull	0.9678	2.3307	15.0041	0.0073	1.8579

R² = Coeficiente de determinación, CME = Cuadrado medio del error, β'_s = Parámetros estimados.

R² = Coefficient of determination, CME = Mean square error, β'_s = Estimated parameters.

SCHUMACHER



SCHUMACHER

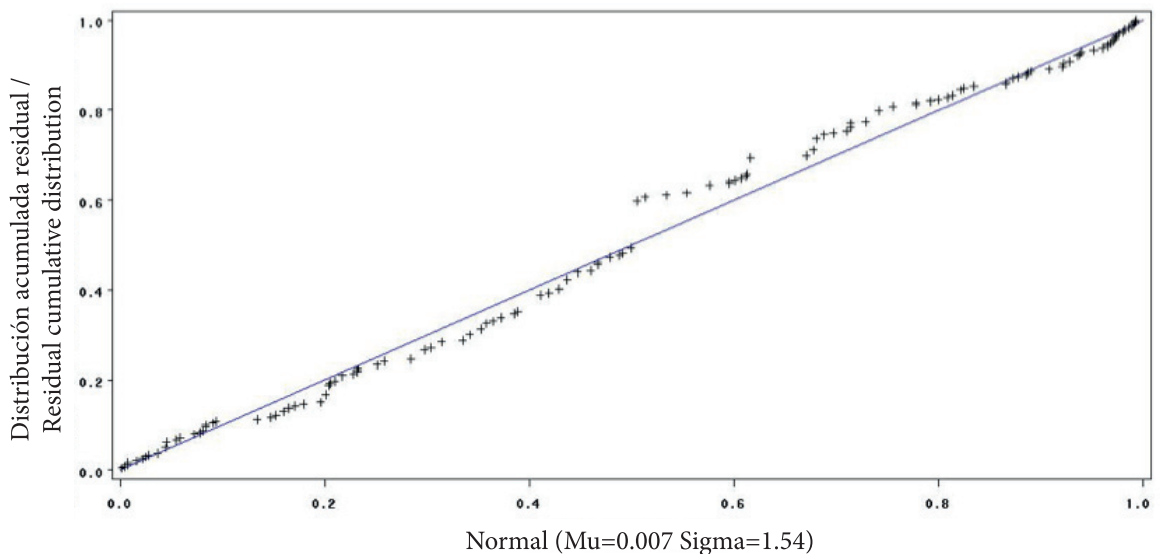


FIGURA 2. Pruebas gráficas de normalidad del modelo de Schumacher para la distribución de residuales de datos de altura dominante y edad de *Pinus greggii* en plantaciones de Metztlán, Hidalgo.

FIGURE 2. Graphic evidence of the normality of the Schumacher model in the distribution of residuals of the data for dominant height and age in *P. greggii* plantations in the municipality of Metztlán, Hidalgo.

Definida la edad base y la tendencia de la curva guía con la ecuación anterior, se decidió utilizar cinco etiquetas de IS correspondientes a los 12, 14, 16, 18 y 20 m. Las familias de curvas anamórficas y polimórficas se construyeron sustituyendo los valores en la ecuación en su forma respectiva, como se muestra a continuación:

Forma anamórfica: $H = IS e^{-13.5144(30 - E^{-1})}$
 Forma polimórfica: $H = 24.7233 \left(\frac{IS}{24.7233} \right)^{\frac{30}{E}}$

En la Figura 3 se observan las familias de curvas de índice de sitio de tipo anamórficas y polimórficas, las cuales permiten clasificar las plantaciones de acuerdo con su potencial de productividad, permitiendo diferenciar con claridad la calidad de estación de las mismas.

Figure 3 shows the anamorphic and polymorphic site index curve families obtained, which allow classifying plantations according to the potential productivity and therefore clearly differentiating them in terms of site quality.

This system of equations expresses site quality for dominant height in plantations of *P. greggii*. Moreover, the growth trend expressed by these curves is similar to that found for other species of *Pinus* (Cornejo *et al.*, 2005; Madrigal *et al.*, 2005; Mares *et al.*, 2004; Rodríguez & Arteaga, 2005; Sánchez & Castillo, 2001; Vargas-Larreta, Álvarez-González, Corral-Rivas, & Aguirre-Calderón, 2010).

Curve families using the two methods of construction were compared based on the accuracy with which the observed

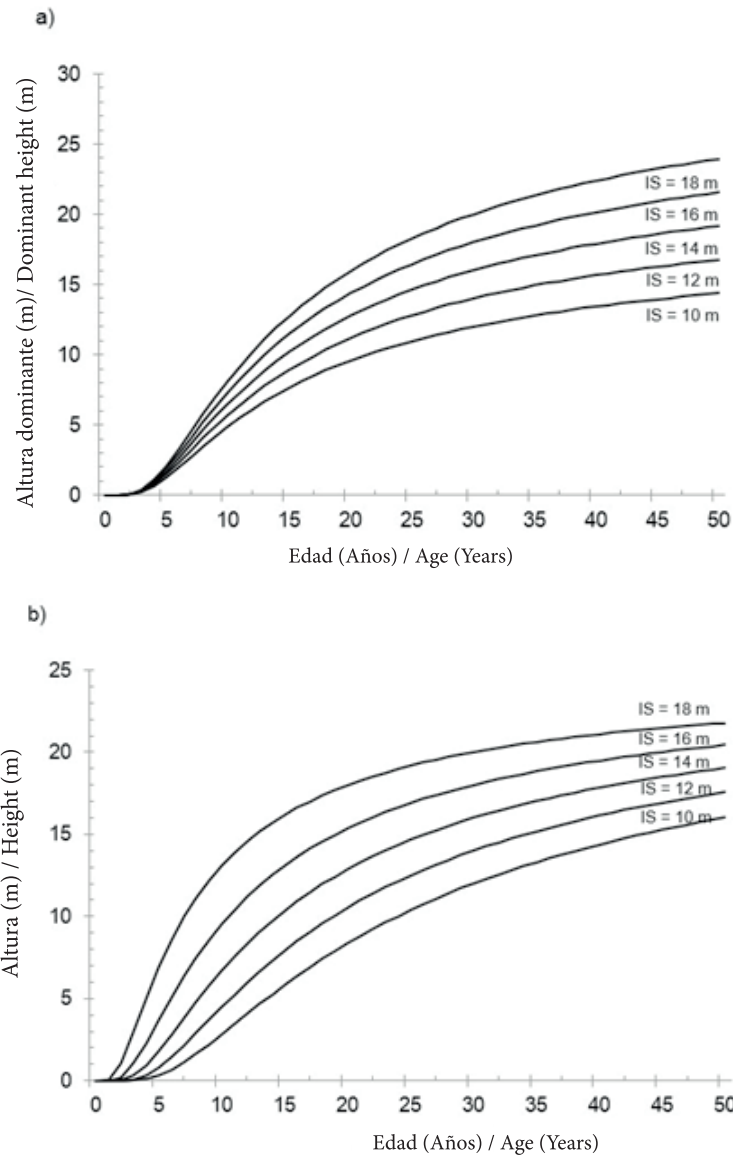


FIGURA 3. Familia de curvas anamórficas (a) y polimórficas (b) de índice de sitio (IS) a una edad base de 30 años en plantaciones de *Pinus greggii* en Metztlán, Hidalgo.

FIGURE 3. Anamorphic (a) and polymorphic (p) site index curve families for *P. greggii* in plantations in the municipality of Metztlán, Hidalgo with reference age of 30 years.

El sistema de ecuaciones representado en la Figura 3 expresa la calidad de sitio para la altura dominante en plantaciones de *P. greggii*. Además, la tendencia de crecimiento de las curvas es similar a lo encontrado para otras especies de *Pinus* (Cornejo et al., 2005; Madrigal et al., 2005; Mares et al., 2004; Rodríguez & Arteaga, 2005; Sánchez & Castillo, 2001; Vargas-Larreta, Álvarez-González, Corral-Rivas, & Aguirre-Calderón, 2010).

Las familias de curvas se compararon con base en la fidelidad con que se representaban los valores observados. En la Figura 4a se observa que las curvas anamórficas de IS estimadas cubren la tendencia del intervalo de dispersión de los datos, lo que demuestra que el método propuesto es adecuado para el objetivo del trabajo. En el caso de la familia de curvas polimórficas (Figura 4b) se observa que a edades menores, las curvas sobrestiman, mientras que a edades

values are represented. Figure 4a shows that estimated anamorphic curves for site index cover the range of scatter of the data, which shows that the proposed method is suitable for the purpose of this study.

In the case of the polymorphic curve family (Figure 4b) it can be observed that at younger ages the curves overestimate observed values while at older ages the curves generated for high site index classes tend to underestimate the observed values.

Beginning with the guide curve, with base age defined as 30 years and with the five site index curves for 12, 14, 16, 18 and 20 meters, respectively, it was possible to develop a system of anamorphic and polymorphic curves representing growth and productivity based on the dominant height of *P. greggii*, as mentioned by Gómez-Tejero *et al.*, 2009.

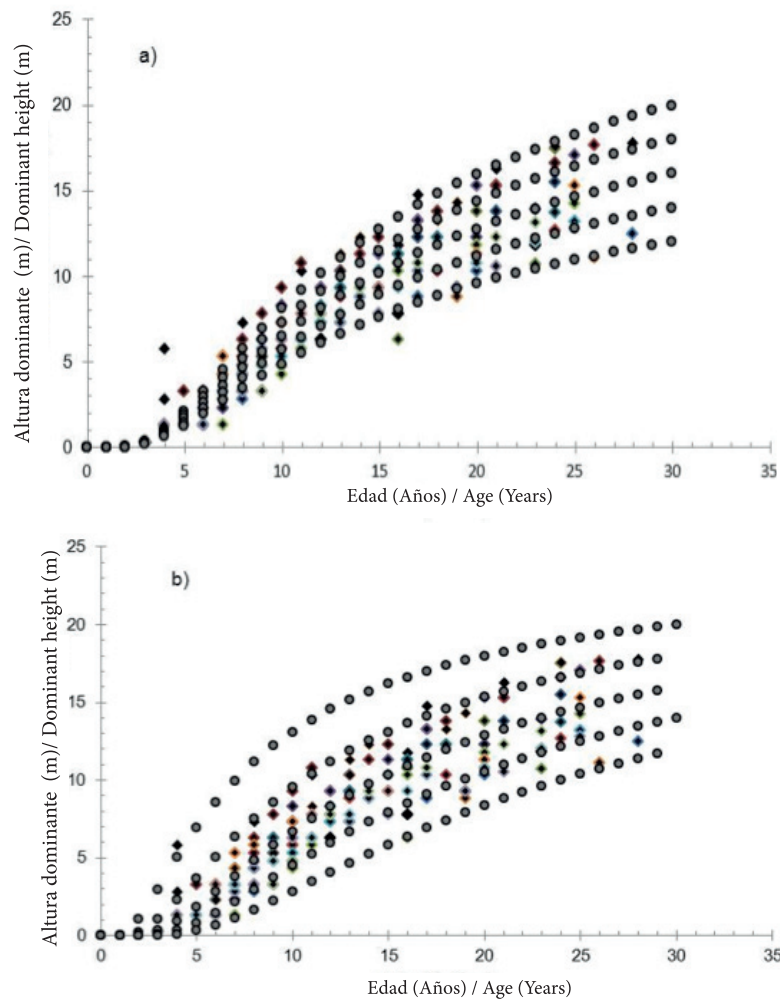


FIGURA 4. Comparación gráfica de valores observados (·) y predichos (♦) de las familias de curvas anamórficas (a) y polimórficas (b) de índice de sitio a una edad base de 30 años en plantaciones de *Pinus greggii* en Metztlán, Hidalgo.

FIGURE 4. Graphical comparison of observed and predicted values for families of anamorphic (a) and polymorphic (p) curves of site index for *P. greggii* with a reference age of 30 years in the municipality of Metztlán, Hidalgo.

mayores, las curvas generadas para clases de IS altas tienden a subestimar los valores observados.

A partir de la curva guía, la edad base definida en 30 años y las cinco curvas en los IS, establecidas en 12, 14, 16, 18 y 20 m, se pudo elaborar el sistema de curvas anamórficas y polimórficas que representan el crecimiento y productividad de las áreas a través de la altura dominante de *P. greggii*, tal como lo mencionan Gómez-Tejero, De los Santos-Posadas, Fierros-González, y Valdez-Lazalde (2009).

CONCLUSIONES

El modelo de Schumacher fue el de mejor ajuste de los datos de edad-altura dominante, por lo que fue el más apropiado para describir el crecimiento en altura de *P. greggii* en función de la edad. Las curvas polimórficas generadas sobrestiman el crecimiento en altura de los árboles de los rodales con índice de sitio de mayor calidad a edades tempranas, y subestiman dicho crecimiento en calidades de sitio pobres. Las familias de curvas anamórficas representan el intervalo de dispersión de los valores con mayor fidelidad, por lo que son las adecuadas para calificar el índice de sitio de plantaciones forestales de *P. greggii* en el municipio de Metztlán, Hidalgo. El modelo de Schumacher puede utilizarse para construir curvas de índice de sitio en la región del municipio de Metztlán, Hidalgo, y las ecuaciones generadas deberán aplicarse dentro del intervalo de las variables dimensionales y las edades consideradas en el estudio. Por otro lado, si esta información de índice de sitio desea utilizarse en un intervalo más amplio será necesaria la validación de los datos presentados.

REFERENCIAS

- Álvarez, G. J., Barrio, A. M., Diéguez, A. U., & Rojo, A. A. (2004). Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 18(1), 303–309. Obtenido de <http://www.seforestales.org/web/images/stories/c18.pdf>
- Andenmatten, E., & Letourneau, F. (2000). *Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para Pinus ponderosa (Dougl.) Law, de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Obtenido de <http://inta.gob.ar/>
- Barreto-Medel, H., Frederic, M., Nepveu, G., & Álvarez-Lazo, C. D. (2011). Curvas anamórficas de índice de sitio para plantaciones de *Pinus caribea* Morelet var. *Caribea* Barret y Golfari de la empresa forestal integral MACURIJE (IFI) en la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 245–252. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.06.035
- Cornejo, O. E. H., Pereyra, G. J. A., Mares, A. O., Valencia, M. S., & Celestino F. L. (2005). Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3), 213–219. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028305>

CONCLUSION

The Schumacher model was the model that best fit the dominant height–age data as well as being the model that best described the height growth of *P. greggii* as a function of age. The polymorphic curves which were generated overestimate height growth of younger trees for stands with higher site quality indices and underestimate growth for poorer quality sites. The families of anamorphic site index curves more accurately represent the range of scatter of the data, so they are appropriate for qualification of the site index of forest plantations of *P. greggii* in the municipality of Metztlán, Hidalgo. The Schumacher model can be used to construct site index curves in the region of Metztlán, Hidalgo, and the equations generated should be applied within the range of dimensional variables and ages considered in the study. On the other hand, if the site index information generated here is to be used on a wider range of data it will be necessary to validate the data presented.

End of English Version

- Crechi, E. H., Fassola, E. H., Keller, A. E., & Barth S. R. (2011). Desarrollo de funciones de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 37(3), 238–248. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3959721>
- De los Santos-Posadas H. M., Montero-Mata, M., & Kanninen, M. (2006). Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazónica* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia*, 40(1), 521–532. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2006/jul-ago/art-11.pdf>
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Offset Larios.
- García, C. X., Flores, G. J. G., & Benavides, S. J. D. (2007). Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. (Cedro Rojo) en Quintana Roo. *Ciencia Forestal en México*, 4(32), 101–148. Obtenido de <http://www.revistasinifap.org.mx/index.php/Forestales/article/view/89>
- García, C. X., Parraguirre, C., & Rodríguez, B. (1992). Modelos de crecimiento para una plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King). *Revista Ciencia Forestal en México*, 17(71), 87–102. Obtenido de <http://revistas.inifap.gob.mx/index.php/Forestales/article/view/1184/1182>
- Gómez-Tejero, J., De los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, A. M., & Valdez-Lazalde, J. R. (2009). Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalipto grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Clake en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 161–169. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61011222011>
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI). (1992). *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo*. México, D. F.: Autor.
- Jerez-Rico, M., Moret-Barillas, A. Y., & Carrero-Gámez, O. E. (2011). Curvas de índice de sitio basadas en modelos

- mixtos para plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.f.). *Agrociencia*, 45(1), 135–145. Obtenido de <http://scielo.unam.mx/pdf/agro/v45n1/v45n1a12.pdf>
- Madrigal, H. S., Moreno, C. J., & Vázquez, C. I. (2005). Comparación de dos métodos de construcción de curvas de índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. Región Hidalgo-Zinapécuaro, Michoacán. *Revista Ciencia Nicolaita*, 40(1), 157–172. Obtenido de http://www.cic.umich.mx/documento/ciencia_nicolaita/2005/40/Cn40-157.pdf
- Mares, A. O., Cornejo, O. E. H., Valencia, M. S., & Flores L. C. (2004). Índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en Cd. Hidalgo, Michoacán. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(1), 77–80. Obtenido de <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/27-1%20Especial%201/16r.pdf>
- Montero, M., & Kanninen, M. (2003). Índice de sitio para *Terminalia amazonia* en Costa Rica. *Agronomía Costaricense*, 23(1), 29–35. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43627103>
- Rodríguez-Acosta, M., & Arteaga-Martínez, B. (2005). Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 39–44. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911106>
- Sánchez, V. N. M., & Castillo, S. R. F. (2001). Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. *Revista Forestal Veracruzana*, 3(2), 9–12. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49703202>
- Statistical Analysis System (SAS). (1992). *SAS/STAT User's Guide. Release 6.03 ed.* Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Torres, R. J. M. (2001). Curvas de índice de sitio de forma y escala variable en investigaciones forestales. *Revista Agrociencia*, 35(1), 87–98. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2001/ene-feb/art-8.pdf>
- Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas, J. J., & Aguirre-Calderón, A. (2010). Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 343–351. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61015520008>