



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.793>

Artículo

Índice de sitio para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México

Site index for commercial tree plantations of *Cedrela odorata* L. in Quintana Roo, Mexico

Xavier García Cuevas¹, Carlos Toledo Chiu², Jonathan Hernández Ramos^{1*}

Juan Ángel Mendoza Muñoz³ y Adrián Hernández Ramos⁴

Abstract

For a sustainable management of commercial forest plantations (CFP), it is essential to know the productive capacity of the site to estimate its profitability. Site quality, hereafter, Site Index (SI) is a reliable way to classify forest areas according to productivity. However, in *Quintana Roo*, the most of CFP do not have such information, so the aim of this study was to fit SI equations of CFP of *Cedrela odorata* in *Quintana Roo* State. For this purpose, 1 943 dominant height-age (*Dh-E*) data pairs were collected from temporary plots on plantations from 1 to 28 years old, three growth models were fitted to data in SAS 9.4[®]. According to the analysis, we used of the adjustment in the values of the root of the mean square of the error (RMSE), adjusted coefficient of determination ($R^2_{adj.}$) and parameters significance, in addition to the bias (\bar{E}) and aggregate deviation (*DA %*) for the estimates, the Weibull growth model was selected as the best for the construction of a guide curve and anamorphic and polymorphic growth curves for *Dh*. The base age (E_0) was defined at 25 years old and three *IS* classes were established at 14 m, 17 m and 20 m. Statistical results confirm that they can be reliably used to classify CFP based on productivity and to propose forestry treatments according to *C. odorata* in the state of *Quintana Roo*, Mexico.

Key words: Station quality, red cedar, anamorphic curves, polymorphic curves, forest management, state of *Quintana Roo*.

Resumen

Para un manejo sostenible de las plantaciones forestales comerciales (PFC), es fundamental conocer la capacidad productiva del sitio para estimar su rentabilidad. La calidad de estación expresada en función del Índice de Sitio (*IS*) es una metodología confiable para clasificar las áreas forestales de acuerdo con su productividad. La mayoría de las PFC de *Quintana Roo* no tienen esa información, por lo que el objetivo del presente estudio fue ajustar y comparar ecuaciones de *IS* para PFC de *Cedrela odorata* en el estado de *Quintana Roo*. Con 1 943 pares de datos de altura dominante–edad (*Ad-E*) de entre uno y 28 años, se ajustaron tres modelos de crecimiento en el paquete estadístico SAS 9.4[®]. De acuerdo a los valores de la raíz del cuadrado medio del error (*RCME*), coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{adj.}$) y significancia de los parámetros, además, del sesgo (\bar{E}) y desviación agregada (*DA %*) para las estimaciones, se seleccionó el modelo de crecimiento de *Weibull* para la construcción de una curva guía y derivar curvas de crecimiento anamórficas y polimórficas de *Ad*. La edad base (E_0) se estableció en 25 años y se definieron tres clases de *IS* a los 14 m, 17 m y 20 m. Los resultados estadísticos y el análisis gráfico de la tendencia de los datos estimados con los observados confirman que pueden utilizarse de forma confiable para clasificar las PFC por su productividad, o proponer tratamientos silvícolas acorde al crecimiento de *C. odorata* en *Quintana Roo*, México.

Palabras clave: Calidad de estación, cedro rojo, curvas anamórficas, curvas polimórficas, manejo forestal, *Quintana Roo*.

Fecha de recepción/Reception date: 6 de junio de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de octubre de 2020.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Chetumal. México.

²Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza. México.

³Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA)-Gobierno del Estado de *Quintana Roo*. México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Saltillo. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: forestjonathanhdez@gmail.com

Introducción

La clasificación de la productividad de las áreas forestales es la base para la planificación del establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales (PFC) (Carrero *et al.*, 2008); ya que, la diferencia en productividad dentro de las localidades determina aspectos críticos de manejo, tales como la edad (E) para aplicar los tratamientos silvícolas, el turno de cosecha, las técnicas de aprovechamiento o los indicadores de rentabilidad (Andenmatten y Letourneau, 1998; Gaillard *et al.*, 2002). Ante dicho panorama, es fundamental conocer el ritmo del crecimiento de las especies plantadas con fines comerciales (Aguirre-Calderón, 2015).

La metodología más usada para clasificar la calidad de estación de rodales forestales es el Índice de Sitio (IS) (Álvarez *et al.*, 2004; Cornejo *et al.*, 2005; Madrigal *et al.*, 2005; Hernández-Ramos *et al.*, 2014), definido como la altura dominante (Ad) que alcanza el rodal a una edad base (E_0) o de referencia. La Ad en un rodal monoespecífico y coetáneo es poco afectada por la densidad, sigue un patrón determinado y tiene alta correlación con la producción del volumen maderable (Clutter *et al.*, 1983; Torres y Magaña, 2001).

Para representar el IS , se emplean curvas de Ad que expresan el patrón de crecimiento promedio de los árboles a través de ecuaciones no lineales, a partir de las cuales se construyen curvas de calidad de estación o de productividad, que pueden ser proporcionales entre sí (anamórficas), o poseer patrones de crecimiento particulares para cada IS (polimórficas) (Clutter *et al.*, 1983; Torres y Magaña, 2001; Hernández-Ramos *et al.*, 2015).

En el estado de Quintana Roo, hasta 2014 existía una superficie de 2 722 ha cubierta de PFC, de las cuales en 2 155 ha se estableció *Cedrela odorata* L. como especie prioritaria (Conafor, 2016).

La falta de información sobre la productividad de las plantaciones y de las herramientas biométricas para su manejo ha ocasionado que no se alcance el máximo rendimiento potencial y de rentabilidad. Por lo anterior, y debido a la importancia del

cálculo del *IS* para la planeación del manejo forestal de las áreas arboladas bajo cultivo, a partir de la hipótesis de que existe un diferencial del potencial de crecimiento entre localidades y dado que se pueden ajustar ecuaciones que modelan las relaciones funcionales entre la *Ad* y la *E* de los árboles, se planteó el objetivo de ajustar y comparar ecuaciones de *IS* para PFC de *C. odorata* en Quintana Roo, México.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó con datos procedentes de las PFC de *C. odorata* ubicadas en los municipios Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Othón P. Blanco, Quintana Roo, México. El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano y parte del invierno, la oscilación térmica es menor a 5 °C ($Aw(x')_i$) (García, 1983). La temperatura media anual es de 25.5 °C y la precipitación media anual de 1 260 mm, con una época seca pronunciada entre diciembre y mayo (INEGI, 2016).

Las PFC se localizan en terrenos semiplanos, en suelos que de acuerdo a la terminología maya y su equivalente según la IUSS Grupo de trabajo WRB (2007) corresponden a: *Tzek'el* (Leptosol), *Kakab* (Rendzina); *K'ankab* (Luvisol crómico), *Yax-hoom* (Vertisol pélico) y *Ak'alche* (Vertisol gleyco).

Se evaluaron 24 PFC de uno a 28 años de edad mediante parcelas temporales de 400 m² (Figura 1), en las cuales se seleccionaron los árboles dominantes en altura y se obtuvieron 1 941 pares de datos *Ad-E*. Se eligieron individuos sin daños ocasionados por plagas, enfermedades o efectos mecánicos. Para medir la *Ad* se utilizó un clinómetro *Sunnto*® y la edad se calculó con base en la información de los propietarios sobre el año de establecimiento.



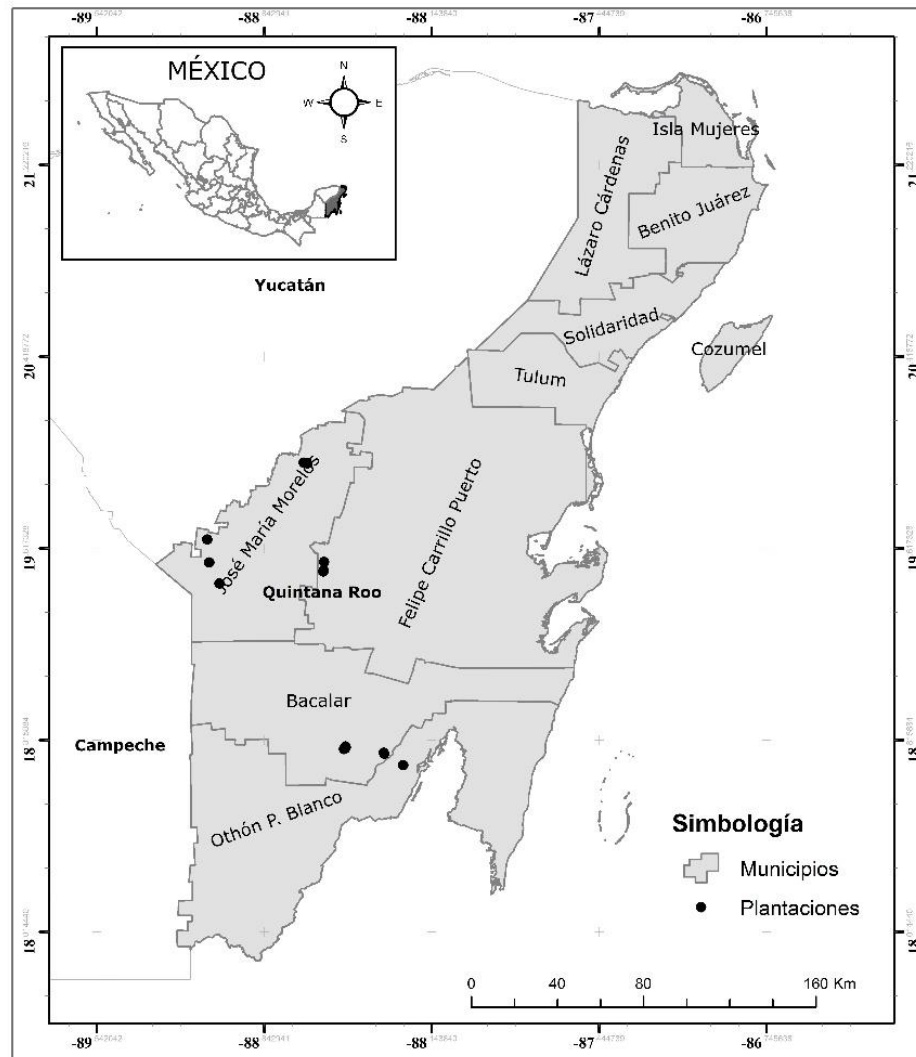


Figura 1. Localización de las plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en el área de estudio.

A la base de datos depurada, se ajustaron los modelos de crecimiento de *Schumacher* (1), *Champan-Richards* (2) y *Weibull* (3) consignados en la literatura especializada (Kiviste *et al.*, 2002; Burkhart y Tomé, 2012; Panik, 2013), los cuales han mostrado resultados satisfactorios en diversos estudios para describir el crecimiento en *Ad-E* e *IS* (García *et al.*, 1992; García *et al.*, 2007; Hernández-Ramos *et al.*, 2014; Murillo-Brito *et al.*, 2017) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos de crecimiento para altura dominante (*Ad*), curvas y clasificación de índice de sitio (*IS*) para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

Modelo	Ecuación	Curvas de <i>IS</i>	Clasificación <i>IS</i>
<i>Schumacher</i> (anamórficas)	$Ad = \beta_0 e^{-\beta_1/E}$	$Ad = IS e^{-\beta_1/(E_0-E)}$	$IS = Ad e^{-\beta_1/(E_0-E)}$
<i>Schumacher</i> (polimórficas)	$Ad = \beta_0 \left(\frac{IS}{\beta_0}\right)^{\frac{E_0}{E}}$	$Ad = \beta_0 \left(\frac{IS}{\beta_0}\right)^{\frac{E_0}{E}}$	$IS = \beta_0 \left(\frac{Ad}{\beta_0}\right)^{\frac{E}{E_0}}$
<i>Chapman-Richards</i> (anamórficas)	$Ad = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 E})^{\beta_2}$	$Ad = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E}}{1 - e^{-\beta_1 E_0}} \right]$	$IS = Ad \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E}}{1 - e^{-\beta_1 E_0}} \right]$
<i>Chapman-Richards</i> (polimórficas)		$Ad = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 E})^{\left(\frac{\ln(IS)/\beta_0}{\ln(1 - e^{-\beta_1 E_0})}\right)}$	$IS = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 E})^{\left(\frac{\ln(Ad)/\beta_0}{\ln(1 - e^{-\beta_1 E_0})}\right)}$
<i>Weibull</i> (anamórficas)	$Ad = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 E^{\beta_2}})$	$Ad = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 E_0^{\beta_2}}} \right]$	$IS = Ad \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 E_0^{\beta_2}}} \right]$
<i>Weibull</i> (Polimórficas)		$Ad = \beta_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{E}{E_0}\right)^{\beta_2} \ln\left(1 - \frac{IS}{\beta_0}\right)} \right]$	$IS = \beta_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{E}{E_0}\right)^{\beta_2} \ln\left(1 - \frac{Ad}{\beta_0}\right)} \right]$

E_0 = Edad base; β 's = Parámetros de estimación; E = Edad (años).

La información se procesó en el paquete estadístico SAS 9.4[®] con el procedimiento *Model* y la técnica de máxima verosimilitud (SAS, 2016). La determinación de la bondad de ajuste de los modelos se basó en resultados de análisis cuantitativos, utilizados en estudios de modelación y biometría forestal (Corral-Rivas *et al.*, 2007). Se consideró el menor valor de la Raíz del Cuadrado Medio del Error (*REMC*) y el mayor valor en el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{adj.}$); se incluyó a los indicadores de sesgo promedio (\bar{E}) y la desviación agregada en porcentaje (*DA %*), además de la significancia de los parámetros y la distribución de residuales (Prodan *et al.*, 1997; Lencinas y Mohr-Bell, 2007; Hernández-

Ramos *et al.*, 2020). Para verificar los supuestos de normalidad de los datos y homocedasticidad de los residuos se utilizó la prueba de *Shapiro-Wilk* (SW) y la distribución grafica de residuales, respectivamente (Hernández-Ramos *et al.*, 2020).

En virtud que la calidad de ajuste no refleja, necesariamente, el apego de las estimaciones a los datos observados (Kozak y Kozak, 2003; Quevedo *et al.*, 2004; Hernández-Ramos *et al.*, 2015) para reforzar el criterio de selección de la mejor ecuación, se realizó una comparación grafica de las curvas guías sobrepuestas a los datos observados y se eligió la que presentara mejor fidelidad. Además, se seleccionó el modelo que mostró una tendencia sigmoide, un punto de inflexión en el que los incrementos corrientes (ICA) y medios (IMA) se igualen, ya que algunos no suelen describir adecuadamente el crecimiento de los árboles y una asíntota o máximo crecimiento posible a una edad infinita. El punto de cruce en el que ICA=IMA, se obtuvo de acuerdo a la metodología de Kiviste *et al.* (2002).

Con la ecuación base seleccionada por su ajuste y predicción, se generó la curva guía en Ad , al considerar que cuando la E se hace igual a la edad base (E_0), entonces la Ad es igual al IS . De la ecuación de IS , se despejó el parámetro referente a la asíntota y la expresión se sustituyó en la ecuación base, con lo que el parámetro asintótico se considera implícito y los parámetros de forma fueron comunes para todos los sitios (Clutter *et al.*, 1983); de este modo, al variar la E y las clases de IS y mantener constante la E_0 , se generaron las curvas anamórficas.

Las curvas polimórficas se generaron de la siguiente manera: de las ecuaciones de IS se despejó alguno de los parámetros de los exponentes, el asociado a la velocidad de crecimiento o al sitio, y se sustituyeron en la ecuación base. De manera análoga, al variar la E y las clases de IS y mantener constante la E_0 , se generaron las curvas polimórficas (García *et al.*, 2007).

Al establecer una E_0 equivalente al turno establecido en 25 años y de acuerdo al intervalo de dispersión de datos observados, se asignaron clases de IS para las curvas de calidad de estación; mientras que, en el modelo se sustituyeron los valores de las clases de IS y E_0 (Clutter *et al.*, 1983; Carrero *et al.*, 2008; Tamarit-Urias *et al.*, 2014; García-Espinoza *et al.*, 2019).

Resultados y Discusión

La tendencia de dispersión de los 1 943 pares de datos utilizados *Ad-E* de árboles de *C. odorata* presentaron una tendencia sigmoide, en la que se observa un incremento en el crecimiento de la *Ad* en las PFC conforme aumenta la edad (Figura 2).

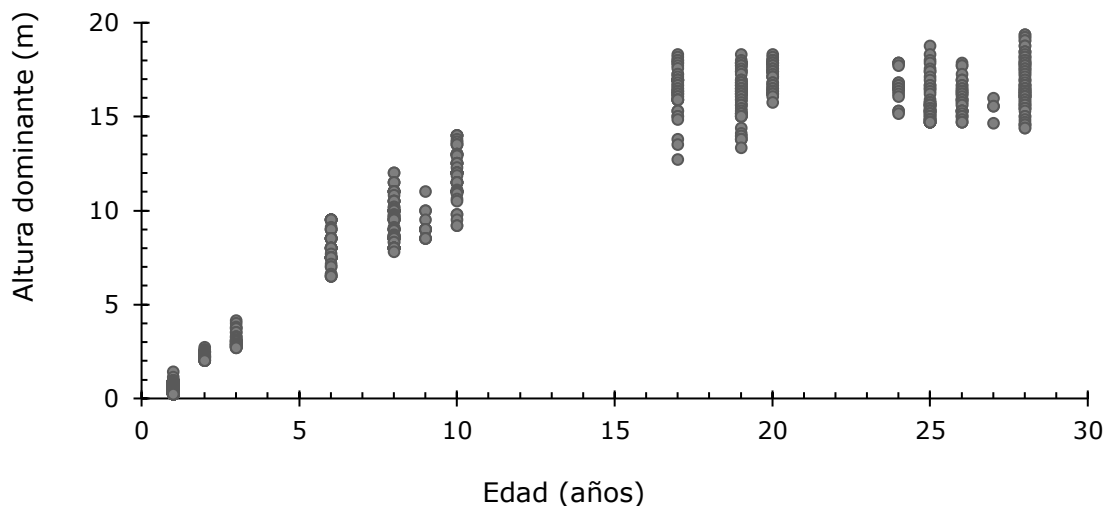


Figura 2. Dispersión de datos observados altura dominante-edad de árboles establecidos en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

El intervalo de edades varió de uno a 28 años y la *Ad* de 0.49 a 17.66 m, con valores mínimos y máximos de entre 0.22 m a 19.35 m, respectivamente. La variación en *Ad* de los árboles para cada edad fue baja, ya que fluctuó alrededor de 0.71 % a 42.26 %, pero en la mayoría de las plantaciones varió de 2 % a 11 % (Cuadro 2).



Cuadro 2. Estadísticos básicos de los árboles dominantes en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

No.	Ubicación	Municipio	Edad (años)	Suelo	Altura dominante (m)				
					Prom	Mín	Máx	STD	CV (%)
1	S.F. Bacalar		1	Yax-hoom	0.83	0.72	0.95	0.06	7.31
2	S.F. Bacalar		1	K'ankab	0.49	0.22	1.42	0.21	42.26
3	S.F. Bacalar		2	Yax-hoom	2.16	2.00	2.6	0.20	9.08
4	S.F. Bacalar		2	K'ankab	2.32	2.10	2.73	0.16	6.79
5	S.F. Bacalar		3	Yax-hoom	3.88	3.70	4.15	0.19	4.87
6	S.F. Bacalar		3	K'ankab	2.96	2.70	3.50	0.22	7.54
7	S.F. Bacalar	Bacalar	6	Puslum Yax-hoom	6.84	6.50	8.00	0.48	7.02
8	S.F. Bacalar		6	Puslum	8.30	7.50	9.50	0.75	9.01
9	S.F. Bacalar		8	T'zekel	9.24	8.30	11.00	0.71	7.71
10	S.F. Bacalar		8	Puslum Yax-hoom	8.45	7.80	10.00	0.65	7.69
11	S.F. Bacalar		8	Puslum	10.5	9.50	12.00	0.72	6.84
12	S.F. Bacalar		9	Puslum	9.15	8.50	11.00	0.66	7.17
13	S.F. Bacalar		10	Puslum	12.14	11.00	14.00	0.91	7.49
14	Puerto Arturo		10	K'ankab	12.30	9.80	13.8	1.41	11.47
15	San Felipe III		10	Yax-hoom	9.95	9.20	11.10	0.85	8.50
16	S.F. Bacalar	José María Morelos	17	Puslum	16.83	15.90	18.30	0.72	4.29
17	Sabana San Fco.		17	Ak'alche	14.43	12.70	15.30	0.97	6.73
18	S.F. Bacalar		19	Puslum	16.44	15.00	18.30	0.92	5.57
19	Nuevo Tabasco		19	K'ankab	14.05	13.35	15.30	0.55	3.89
20	S.F. Bacalar		20	Puslum Yax-hoom	16.79	15.75	17.85	0.65	3.89
21	S.F. Bacalar		20	Puslum	17.66	17.10	18.30	0.39	2.18
22	S.F. Bacalar		24	yax-hoom	16.59	15.15	17.85	0.87	5.22
23	S.F. Bacalar	Bacalar	25	Puslum	15.79	14.70	18.75	1.06	6.72
24	S.F. Bacalar		26	Yax-hoom	15.94	14.70	17.85	0.87	5.48
25	S.F. Bacalar		26	Puslum	16.00	14.70	17.70	0.87	5.41
26	S.F. Bacalar		27	Puslum	15.43	14.64	15.99	0.57	3.67
27	Chunhuhub	Felipe Carrillo Puerto	28	Ak'alche	15.79	14.4	17.7	1.03	6.56
28	S.F. Bacalar	Bacalar	28	Puslum	17.23	15.45	19.35	1.15	6.68
29	S.F. Bacalar		28	Puslum	14.93	14.85	15.00	0.11	0.71

Prom = Promedio; Mín = Mínimo; Máx = Máximo; STD = Desviación estándar;
CV = Coeficiente de variación.

En el Cuadro 3 se observan los criterios de bondad de ajuste en los que los modelos (3) y (2) alcanzaron los valores más altos en el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{adj.}$), menor $RCME$ y todos sus parámetros resultaron significativos ($\alpha < 0.05$). Al respecto, Gujarati (2010) argumenta que son aceptables valores superiores a 0.7 y 0.8; por lo que, los tres modelos explican la variabilidad de los datos.

Cuadro 3. Estadísticos de bondad de ajuste y valores de los parámetros de los modelos de crecimiento para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

Modelo	$RCME$	$R^2_{adj.}$	Parámetro	Estimación	Eae	Valor t	$Pr > t $
(1)	0.8784	0.9807	β_0	20.79999	0.0724	287.44	<0.0001
			β_1	-5.65107	0.05	112.99	<0.0001
(2)	0.731	0.9866	β_0	17.03809	0.0416	410.05	<0.0001
			β_1	0.173224	0.00306	56.69	<0.0001
			β_2	1.882571	0.0469	40.13	<0.0001
(3)	0.7185	0.9871	β_0	16.63671	0.032	519.18	<0.0001
			β_1	0.035244	0.00124	28.43	<0.0001
			β_2	1.552455	0.0173	89.8	<0.0001

$RCME$ = Raíz del cuadrado medio del error; $R^2_{adj.}$ = Coeficiente de determinación ajustado; Eae = Error estándar aproximado; $Pr > |t|$ = Nivel de confiabilidad.

Los valores en los coeficientes de determinación son similares a los registrados por García et al. (1998) para *Swietenia macrophylla* King, con un valor de R^2_{adj} igual a 0.99 al utilizar los mismos modelos, pero superior al calculado por García et al. (2007) de 0.84 en este criterio para *C. odorata* mediante el modelo de *Schumacher* que

mejor explica la variabilidad de la información, como lo indican ambos autores al modelar el *IS* en PFC del estado de Quintana Roo, México.

Diversas investigaciones consignan resultados interesantes. Así, Minoche *et al.* (2017) obtuvieron valores diferentes al ajustar cinco modelos para altura dominante y generar curvas de *IS* de tipo anamórficas con la técnica de diferencia algebraica en plantaciones de *Tectona grandis* L. en Tabasco, México; donde el mejor modelo ajustado fue el de *Sloboda*, con un R^2 de 0.998. Galán *et al.* (2008) ajustaron y determinaron un R^2 de 0.870 y 0.919 en el modelo *Chapman-Richards* para predecir y explicar el crecimiento en altura dominante; y generar curvas anamórficas de *IS* de *C. odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* Rose a una edad base de 10 años que cubrieran los intervalos de edad de 3 a 10 años. Pérez-González *et al.* (2012), al ajustar siete modelos de *IS* para plantaciones de *S. macrophylla* de siete a 16 años en Tabasco, México concluyeron que el modelo de *Korf* fue estadísticamente mejor para realizar la estimación de crecimiento en *Ad* a la E_0 de 10 años en árboles de la especie estudiada ($R^2=0.80$). Martínez-Zurimendi *et al.* (2015) calcularon un valor de 0.58 para la función de *Chapman-Richards* y 0.59 para el modelo de *Weibull* en plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. Murillo-Brito *et al.* (2017) llegaron a un valor de 0.50 con el modelo de *Schumacher* para plantaciones de *C. odorata*, ambos en el estado de Tabasco, México.

En la Figura 3 se aprecia la distribución de residuales, definidos como la diferencia entre el valor real observado y el valor estimado por medio de la ecuación generada. El análisis evidenció que los tres modelos presentaron un buen ajuste y una distribución regular alrededor de cero.



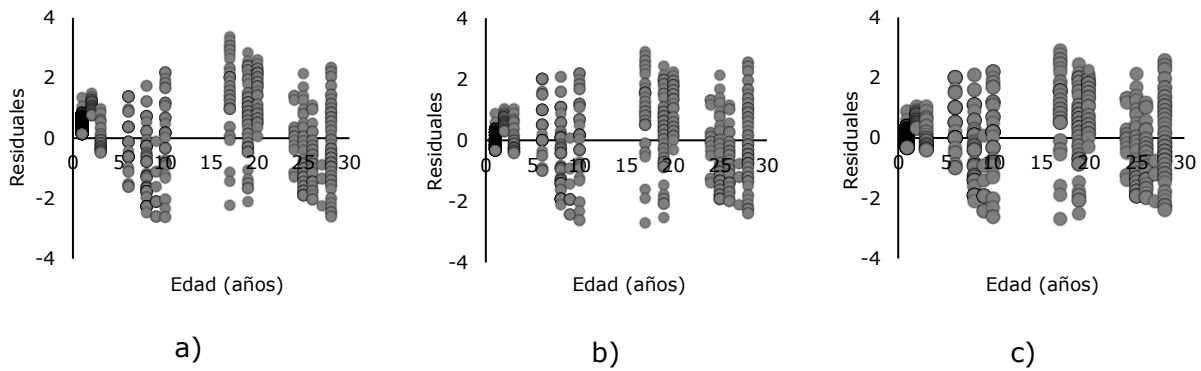


Figura 3. Distribución de residuales de tres modelos de crecimiento para generar índice de sitio para *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

El modelo (3) tuvo el mayor ajuste debido a que la desviación de los valores predichos y los observados (\bar{E}) fue baja, ya que el modelo sobrestima en -0.0131 m a nivel de árbol individual y a nivel de la muestra se tiene una *DA* de -0.2810 %. Los valores negativos de la media de los residuales se explican porque existe una ligera sobrestimación en los datos de la *Ad* predicha, en función de la *E* para plantaciones de *C. odorata* (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estadísticos de evaluación de la capacidad predictiva de los modelos en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

Modelo	Predicción		Normalidad	
	\bar{E}	<i>DA</i> %	<i>SW</i>	
(1)	0.2987	6.42	0.88	<0.0001
(2)	0.0043	9.35	0.89	<0.0001
(3)	-0.0131	-0.28	0.89	<0.0001

\bar{E} = Sesgo; *DA* % = Diferencia agregada; *SW* = *Shapiro-Wilk*.

Al verificar la prueba de *Shapiro-Wilk* para evaluar la normalidad, los mejores modelos fueron el (2) y (3), por presentar un valor de $SW=0.89$ cercano a 1. El modelo de *Schumacher* tuvo un valor más bajo de $SW=0.88$; a pesar de ello, mostró normalidad de los errores. Estos resultados son inferiores a los de García *et al.* (2007), quienes documentan un valor de $SW=0.97$ para plantaciones forestales de *C. odorata* en Quintana Roo; no obstante, que se tuvieron valores más bajos, en las funciones utilizadas no se violó el supuesto de regresión, y por eso son aceptables. Los tres modelos cumplieron con el supuesto de una distribución homogénea de los residuos (Figura 3).

Estos resultados son superiores a los de Martínez-Zurimendi *et al.* (2015) en la referida investigación con *G. arborea* en Tabasco, en la cual utilizaron los modelos de *Chapman-Richards* y *Weibull* y cuyos valores del sesgo fueron de 4.05 m y 4.13 m, respectivamente; en el caso de la DA %, los valores fueron superiores, 16.84 % para el modelo de *Chapman-Richards* y 16.83 % para el de *Weibull*. En el estudio de Murillo-Brito *et al.* (2017) con el modelo de *Schumacher* para plantaciones forestales de *C. odorata*, también en Tabasco, las cifras fueron inferiores, el sesgo fue de -0.0398 m y la DA % de 1.9678 %; por lo que resultó con un mejor ajuste al obtenido en esta investigación, con el mismo modelo.

Las ecuaciones para estimar la curva guía fueron las siguientes:

$$Ad = 20.79999e^{-5.65107/E}, Ad = 17.03809[1 - e^{-0.173224E}]^{1.882571} \text{ y}$$
$$Ad = 16.63671[1 - e^{-0.035244E^{1.552455}}]$$

En la ecuación (3), el parámetro β_0 representa el valor asintótico o máxima altura que los árboles pueden alcanzar (teóricamente a una edad infinita); en este caso a los 28 años, cuando llegan a medir hasta 16.63 m, pues representa el universo de datos de $Ad-E$ utilizados para el ajuste de la ecuación. Respecto al parámetro β_1 , se considera como un parámetro

dependiente del sitio y representa la velocidad de crecimiento, o el número de unidades que aumenta β_0 cuando se modifica una unidad en β_1 , adecuando las escalas por la expresión exponencial. El parámetro β_2 está asociado al sitio.

Se graficaron las curvas guías y los valores observados para analizar la fidelidad de los modelos, lo cual se observa en la Figura 4; donde la curva guía del modelo (3) exhibe una mejor tendencia, ya que tiende a pasar en medio de la nube de observaciones, por lo que describe con mayor precisión la base de datos usada en su ajuste. En el caso del modelo (1), la curva guía a edades menores suele subestimar y a edades mayores a sobreestimar, mientras que el modelo (2) sobreestima a gran escala en edades menores. En este sentido, la investigación de García *et al.* (2007) para la misma especie indicó que el mejor modelo que mostró una tendencia adecuada en la curva guía fue el de *Schumacher*; y en la investigación de Murillo-Brito *et al.* (2017), los modelos que evidenciaron mejor fidelidad de las curvas guías de manera gráfica con los datos observados fueron *Hosfeld IV*, *Monomolecular*, *Logístico* y *Gompertz*.

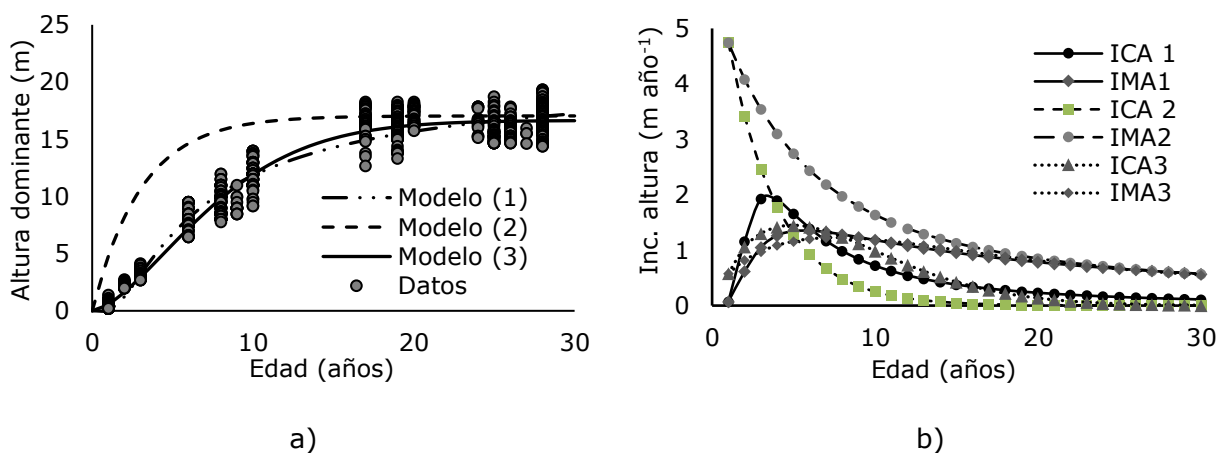


Figura 4. Crecimiento e incremento de curvas para generar Índice de Sitio para *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

Con base en lo anterior, el mejor modelo fue el (3), ya que la curva guía representó el promedio de los datos observados, presentó un punto de inflexión en $ICA=IMA$; conforme a esto, es posible decir que describe adecuadamente el crecimiento en altura de los árboles en función de la edad (Figura 4b). El modelo (1) también tuvo un punto de culminación, pero la tendencia de la curva guía no es adecuada para este estudio. En el caso del modelo (2) no registró un punto de inflexión, lo que significa que no describe adecuadamente la base de datos usada en su ajuste y no puede ser utilizado para la realización de las curvas de IS .

Para calcular la edad en que $ICA=IMA$, se utilizó la fórmula propuesta por Kiviste *et al.* (2002). Se obtuvo un turno técnico de crecimiento en Ad de ocho años para la especie bajo estudio (Figura 4b). Lo anterior es similar a lo obtenido por García *et al.* (2007) para *C. odorata* en la región sur del estado de Quintana Roo, quienes definieron una culminación del crecimiento en Ad de 6.38 años. Por otra parte, los resultados difieren de los de García *et al.* (1998), autores que determinaron cinco IS (12 m, 14 m, 16 m, 18 m y 20 m) a una E_0 de 30 años en plantaciones de *S. macrophylla* en Quintana Roo, con los modelos de *Chapman* y *Richards* y *Weibull*; los cuales, en su versión polimórfica, sobreestiman la altura a edades jóvenes y subestiman a edades mayores. Sin embargo, esto es posible debido a los hábitos de crecimiento y edades de las plantaciones.

Con la ecuación (3) se construyeron curvas de IS a una E_0 de 25 años (Figura 5), se utilizaron tres clases de IS (14 m, 17 m y 20 m). Las expresiones anamórficas (a) y polimórficas (b) mediante el método de la curva guía se expresan a continuación:

(a) Anamórfica:
$$Ad = IS \left[\frac{1 - e^{-0.0352429(25)^{1.552455}}}{1 - e^{-0.0352429(23)^{1.552455}}} \right]$$

(b) Polimórfica:
$$Ad = 16.63671 \left[1 - e^{-\left(\frac{23}{25}\right)^{0.035244}} \ln \left(1 - \frac{IS}{16.63671} \right) \right]$$

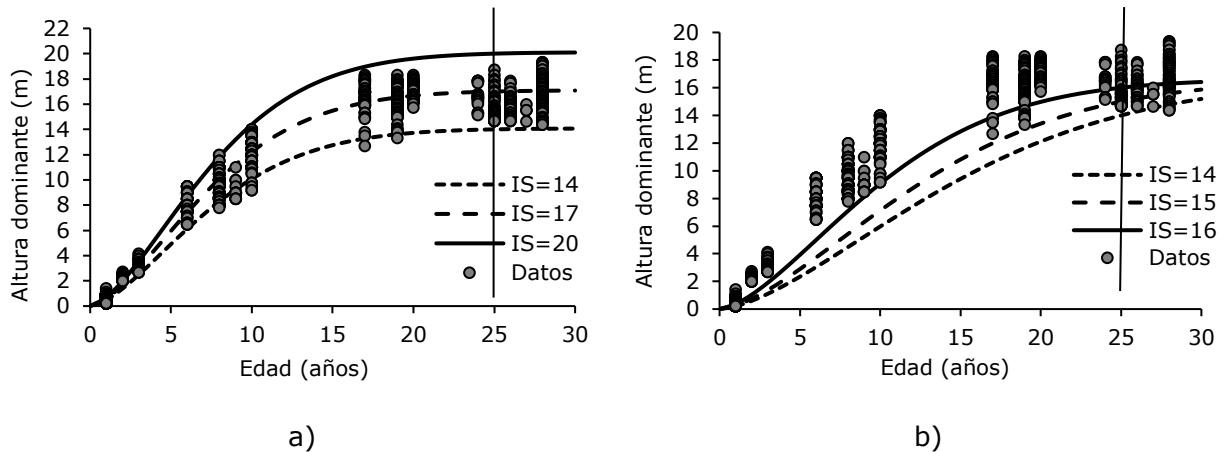


Figura 5. Curvas de crecimiento anamórficas (a) y polimórficas (b) de Índice de Sitio (IS , m) a la edad base de 25 años en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México.

En la Figura 5 se observan las curvas de IS de tipo anamórfico, (5a) y polimórfico (5b) sobrepuestas con los datos observados. Dichas curvas permiten clasificar las plantaciones de *C. odorata* conforme a su productividad, y así diferenciar con claridad la calidad de estación de las mismas.

Las curvas son diferentes en la tendencia de crecimiento de las curvas generadas por García et al. (1992) para *S. macrophylla*, ya que ellos obtuvieron cinco clases de curvas de IS con el modelo de *Chapman-Richards*; y por García et al. (2007) para *C. odorata* en Quintana Roo con el modelo de *Schumacher*, mismo que tiene una geometría diferente. Por su parte, Murillo-Brito et al. (2017) para *C. odorata*, en el estado de Tabasco, generaron tres curvas de IS con el modelo de *Hossfeld IV*, que resultaron en Índices de Sitio de 11 hasta 19 m.

La Figura 5a indica que las curvas anamórficas cubren la tendencia del intervalo de dispersión de los datos, lo que demuestra que el método propuesto es correcto para satisfacer el objetivo del trabajo, aunque la curva de IS de 20 sobrestima en pequeña escala a edades mayores. En el caso de las curvas de crecimiento polimórficas (Figura 5b), se les asignaron otras etiquetas diferentes de IS , ya que con los valores de 14 m,

17 m y 20 m las curvas tienden a sobrestimar en gran escala los datos observados. Los valores de las etiquetas de 14 m, 15 m y 16 m empleadas para construir las curvas polimórficas subestiman ampliamente los datos observados de *Ad-E*. Con estos resultados se puede aseverar que las curvas que presentaron mejor grado de asociación con los datos observados fueron las de tipo anamórfica.

A partir de la curva guía, la E_0 definida a los 25 años y los tres valores de IS , establecidos en 14 m, 17 m y 20 m, se elaboró un sistema de curvas anamórficas que representan el patrón de crecimiento para *C. odorata* en la región centro y sur de Quintana Roo, México.

Con las expresiones obtenidas es factible calificar el IS de cualquier plantación creciendo en el área de estudio. Por ejemplo, suponga una plantación de 23 años de edad con 14.55 m de *Ad* promedio y que el turno de corte en la región es de 25 años, que se definirá como edad de referencia. Estos datos se sustituyen en la expresión de IS , el resultado indica que el IS de esa plantación es de 16.57 m a la edad de 25 años.

$$IS = 14.55 \left[\frac{1 - e^{-0.0352429(25)^{1.552455}}}{1 - e^{-0.0352429(23)^{1.552455}}} \right] = 16.57 \text{ m}$$

Conclusiones

El modelo de *Weibull* es el de mejor ajuste para los datos de altura dominante-edad (*Ad-E*) y para generar curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio de *C. odorata* L. en Quintana Roo, México.

Las curvas polimórficas subestiman el crecimiento en altura de los árboles dominantes de los rodales con las tres etiquetas de índice de sitio (IS) utilizadas; mientras que, las curvas anamórficas representan mayor fidelidad con los valores observados, ya que cubren la tendencia del intervalo de dispersión de los datos. Por esta razón, se

consideran las más adecuadas para calificar el *IS* en plantaciones forestales comerciales de *C. odorata* en Quintana Roo.

La información generada sirve para formar parte de los métodos de planeación para los administradores y técnicos forestales en las actividades de manejo y aprovechamiento forestal, pero los valores obtenidos deberán aplicarse dentro del intervalo de las variables *Ad-E* de uno a 28 años de edad.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo en la realización del presente trabajo a través del proyecto con número SIGI: 3-0.8-87582501-F-E.1-1.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con personas o instituciones.

Contribución por Autor

Xavier García Cuevas: toma de datos de campo, análisis de datos, redacción y corrección del documento; Carlos Toledo Chiu: toma de datos de campo, captura de información, análisis de datos, redacción del documento; Jonathan Hernández Ramos: toma de datos de campo, análisis de datos y revisión del documento; Juan Ángel Mendoza Muñoz: toma de datos de campo y captura de información; Adrián Hernández Ramos: revisión del documento.



Referencias

- Andenmatten E. y F. Letourneau. 1998. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para pino oregón (*Pseudotsuga menziesi* Mirb. Franco) de aplicación en la región andino patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata. 103: 69-75.
<http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/239/156>
(13 de marzo de 2020).
- Álvarez G., J. G., M. Barrio A., U. Diéguez A. y A. Rojo A. 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18(1):303–309. <http://www.secforestales.org/web/images/stories/c18.pdf> (23 de febrero de 2020).
- Aguirre-Calderón, O. A. 2015. Manejo forestal en el siglo XXI. Madera y Bosques 21 (Núm. esp.): 17-28. Doi:10.21829/myb.2015.210423.
- Burkhart, H. E. and M. Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Science & Business Media. New York, NY, USA. 458 p.
- Carrero, O., M. Jerez, R. Macchiavelli, G. Orlandoni y J. Stock. 2008. Ajuste de curvas de Índice de Sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. Interciencia 33(4): 265-272.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000400007
(13 de febrero de 2020).
- Clutter, J., J. Forston, L. Pienaar, G. Brister and R. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons. New York NY, USA. 333 p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2016. Precios de productos forestales maderables: Reporte trimestral Enero/Marzo de 2016. Sistema Nacional de Información Forestal y Gerencia de Fomento a la Producción Forestal Sustentable. Guadalajara, Jal. México.
<http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/economica/sipre> (13 de febrero de 2020).

- Cornejo O., E. H., J. A. Pereyra G., O. Mares A., S. Valencia M. y C. Flores L. 2005. Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. Revista Fitotecnia Mexicana 28(3): 213–219. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028305> (21 de marzo de 2020).
- Corral-Rivas, J. J., M. Barrio-Anta, O. A. Aguirre-Calderón and U. Diéguez-Aranda. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (México). Forestry 80 (1): 29-40. Doi: 10.1093/forestry/cpl048. <https://academic.oup.com/forestry/article/80/1/29/634526> (18 de marzo de 2020).
- Galán L., R., H. M. De los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Madera y Bosques 14(2):65-82. Doi: 10.21829/myb.2008.1421213.
- Gaillard B., C., M. Pece, M. Juárez G. y N. Ríos. 2002. Estimación del crecimiento y producción de una plantación de paraíso gigante (*Melia azedarach* var. *gigantea*) sin riego en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. Quebracho 9: 127-140. <https://www.redalyc.org/pdf/481/48100912.pdf>. (16 de marzo de 2020).
- García, E. 1983. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios S.A. México, D.F., México. 252 p.
- García C., X., C. Parraguirre L. y B. Rodríguez S. 1992. Modelos de crecimiento para una plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King). Ciencia Forestal en México 17(71): 87–102. <http://revistas.inifap.gob.mx/index.php/Forestales/article/view/1184/1182>. (12 de febrero de 2020).

García C., X., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., J. Jasso M. y C. Ortiz S. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo. Ciencia Forestal en México. 23(84): 9-18. http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal_numeros.html 2009

(12 de febrero de 2020)

García C., X., J. G. Flores G. y J. D. Benavides S. 2007. Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) en Quintana Roo. Ciencia Forestal en México 4(32): 101–148. http://www.inifap.gob.mx/revistas/ciencia_forestal_numeros.html y el año 2007 (12 de febrero de 2020).

García-Espinoza, G. G., O. A. Aguirre-Calderón, G. Quiñonez-Barraza, E. Alanís-Rodríguez, M. A. González-Tagle and J. J. García-Magaña. 2019. Global-local and fixed-random parameters to model dominant height growth of *Pinus pseudostrobus* Lindley. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 25(1): 141-156. Doi: 10.5154 / r.rchscfa.2018.06.047.

Gujarati, D. N. 2010. Econometría. 5ª edición. Editorial Mc Graw-Hill/ Interamericana. México, D.F., México. 921 p.

Hernández-Ramos, J., J. J. García-Magaña, E. H. Olvera-Delgadillo, J. C. Velarde-Ramírez, X. García-Cuevas y H. J. Muñoz-Flores. 2014. Índice de sitio para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm: en Metztitlán, Hidalgo, México. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 20(2): 167-176.

Doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.04.016.

Hernández-Ramos, J., J. J. García-Magaña, X. García-Cuevas, A. Hernández-Ramos, H. J. Muñoz-Flores y M. Samperio-Jiménez. 2015. Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham., en el oriente del estado de Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(27): 24-37. Doi: 10.29298/rmcf.v6i27.278.

Hernández-Ramos, J., J. I. Valdez-Hernández, X. García-Cuevas, A. E. Tadeo-Noble y V. J. Reyes-Hernández. 2020. Estimación de la edad de *Swietenia macrophylla* (Meliaceae) a partir del diámetro normal en poblaciones del sureste mexicano. *Revista de Biología Tropical* 68(1): 200-217. Doi: 10.15517 / RBT.V68I1.37725.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016. Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2016. Aguascalientes, Ags., México. 385 p.

IUSS Grupo de trabajo WRB. 2007. Base referencial mundial del recurso suelo: Primera actualización. Informe sobre los recursos mundiales de suelos. Núm. 103. FAO. Roma, Italia. 117 p.

Kiviste A., J. G. Álvarez-González, A. Rojo-Alboreca y A. D. Ruiz G. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia y Tecnología. La Coruña, España. 190 p.

Kozak, A. and R. Kozak. 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? *Canadian Journal of Forest Research* 33: 976-987. Doi: 10.1139/x03-022.

Lencinas, J. D. y D. Mohr-Bell. 2007 Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. *Bosque* 28(2): 106-118. Doi: 10.4067 / S0717-92002007000200003.

Madrigal H., S., C. J. Moreno y C. I. Vázquez. 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. http://www.cic.umich.mx/documento/ciencia_nicolaita/2005/40/Cn40-157.pdf. (16 de marzo de 2020).

Martínez-Zurimendi, P., M. Domínguez-Domínguez, A. Juárez-García, L. M. López-López, V. de-la-Cruz-Arias y J. Álvarez-Martínez. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales comerciales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. Revista Fitotecnia Mexicana. 38(4): 415-425. Doi: 10.35196/rfm.2015.4.415. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n4/v38n4a10.pdf> (15 de abril de 2020).

Minoche, D., C. Herrero, M. Domínguez D. and P. Martínez Z. 2017. Determining the site index of Teak (*Tectona grandis* L.) plantations in Tabasco, Mexico. Ciencia e Investigación Agraria 44(2):154-167.

Murillo-Brito, Y., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi, L. del C. Lagunes-Espinoza y A. Aldrete. 2017. Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 49(1): 15-30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382852189002> (15 de abril de 2020).

Panik, M. J. 2013. Growth curve modelling: theory and applications. John Wiley & Sons, Incorporated. Somerset, NJ, USA. 413 p.

Pérez-González, G., M. Domínguez-Domínguez, P. Martínez-Zurimendi y J. D. Etchevers B. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. Madera y Bosques 18(1):7-24. Doi:10.21829/myb.2012.181511.

Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación de Desarrollo Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 561 p.

Quevedo R., A. M., M. Jerez y A. Y. Moret. 2004. Selección de modelos para predecir distribuciones diamétricas en plantaciones de teca a partir de variables del rodal con la función de Weibull. Revista Forestal Venezolana 48: 68-74. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24286>. (18 de febrero de 2020).

Statistic Analysis System (SAS) 2016. SAS/STAT® 14.1 User´s Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

<https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/141/nlmixed.pdf>
(2 de febrero de 2020).

Tamarit-Urias, J. C., H. M. De los Santos-Posdas, A. Aldrete, J. R. Valdez-Lazalde, H. Ramírez-Maldonado y V. Guerra-De la Cruz. 2014. Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. *Agrociencia* 48(2): 225-238. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n2/v48n2a8.pdf> (10 de marzo de 2020).

Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Ed. Limusa. México, D. F., México. 472 p.



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.