

Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México

Site index for *Cedrela odorata* in the humid tropics of Mexico

Yazmín Murillo-Brito ¹, Marivel Domínguez-Domínguez ^{2*}, Pablo Martínez-Zurimendi ^{3,4}, Luz del C. Lagunes-Espinoza ², Arnulfo Aldrete ⁵

Originales: *Recepción*: 02/12/2014 - *Aceptación*: 11/06/2016

RESUMEN

Los silvicultores de la zona tropical húmeda de México requieren orientación sobre los tratamientos que deben aplicar a sus plantaciones de *Cedrela odorata* y el crecimiento que pueden obtener, para lo cual se realizó el presente trabajo en 22 plantaciones en Tabasco. Los objetivos fueron desarrollar un modelo para determinar el índice de sitio a través de expresiones algebraicas que modelen el crecimiento en altura dominante con la edad de los árboles; y determinar el crecimiento medio anual en volumen de madera de los rodales a la edad de 10 años, para relacionar el índice de sitio con la producción esperada. De los cinco modelos probados, Hossfeld IV obtuvo mejor bondad de ajuste con base en los estadísticos de eficiencia, MRES, AMRES, análisis de residuales y análisis gráfico del ajuste a los datos observados. El modelo es eficiente entre 4 y 12 años de edad. Se establecieron tres clases de índice de sitio: 11 m para calidad baja, 15 m para calidad media y 19 m para calidad alta a una edad base de 10 años. El crecimiento de los árboles estuvo comprendido entre 1,40 en la menor calidad y 21,65 m³·ha⁻¹·año⁻¹ en la mayor calidad a los 10 años.

Palabras clave

índice de sitio • producción maderable • manejo forestal

-
- 1 Programa docente de Postgrado en Producción Agroalimentaria en el Trópico del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados.
 - 2 Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Perif. Carlos A. Molina km 3,5 Carr. Cárdenas-Huimanguillo, A.P. 24. C.P. 86500 H. Cárdenas, Tabasco, México. *mdguez@colpos.mx
 - 3 El Colegio de la Frontera Sur, Grupo Académico Agroecología, Villahermosa, Tabasco. México.
 - 4 Sustainable Forest Management Research Institute Universidad de Valladolid, E. T. S. de Ingenierías Agrarias. Depto. Prod. Veg. Recursos Forestales. Avda. de Madrid, No. 50. 34004. Palencia, España.
 - 5 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Km 36,5 Carr. México- Texcoco. Montecillos, Estado de México. C.P. 56230

ABSTRACT

Foresters of the humid tropical zone of Mexico require direction regarding what treatments they should apply to their plantations of *Cedrela odorata* and the growth rates they can obtain. For this reason, the present study was conducted in 22 plantations in Tabasco, Mexico. The objectives were to develop a model to determine site index through algebraic expressions that model the dominant height growth with tree age, and to determine the mean annual growth in volume of timber in ten-year-old stands, in order to relate the site index to expected production. Of the five models tested, Hossfeld IV obtained the best goodness of fit based on statistics of efficiency, MRES, AMRES, residual analysis and graphic analysis of fit to the observed data. Model is efficient between 4 and 12 years age plantation. Three classes of site index were established: 11 m for low quality, 15 m for medium quality and 19 m for high quality at a base age of ten years. Tree growth comprised between 1.40 and 21.65 m³•ha⁻¹•year⁻¹ at ten years in the lowest and highest qualities, respectively.

Keywords

site index • wood yield • forest management

INTRODUCCIÓN

El rendimiento de una plantación depende, en gran parte, de la capacidad productiva del sitio seleccionado, de la preparación del sitio y del manejo que se le dé a la misma.

En algunos sitios los árboles crecerán rápidamente alcanzando grandes volúmenes en poco tiempo, mientras que en otros, el crecimiento será menor o muy pobre.

La capacidad productiva de un determinado lugar para una especie en particular se conoce como calidad de sitio, definida por un complejo de factores bióticos y abióticos, resultado de la interacción de los factores ambientales y la vegetación existente, también influida por el manejo silvícola aplicado (29).

La calidad de sitio se expresa a través de un índice de sitio que es una expresión cuantitativa de la calidad de sitio (1).

El índice de sitio se define como la altura dominante que pueden alcanzar los árboles de un rodal a una edad de referencia, la cual

se toma como edad base (8, 9, 24), siendo uno de los métodos más usados para expresar de manera indirecta la calidad de sitio en masas coetáneas, preferentemente puras, con base en relaciones de datos de altura dominante -edad.

Existen algunos estudios de determinación de índices de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) en México: García-Cuevas *et al.* (2007) determinaron el índice de sitio en ocho plantaciones en Quintana Roo; Bravo-Medel (2007) en plantaciones de cedro y caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Oaxaca; Galán-Larrea, *et al.* (2008) en plantaciones de enriquecimiento y Quintero-Castañeda (2005) en plantaciones puras en Oaxaca; y Salazar-García *et al.* (2012) en plantaciones jóvenes en Veracruz.

Para la especie se han desarrollado índices de sitio en otros países de África y de América tropical: Dupuy y Mille (1993) desarrollaron una tabla de producción

que incluye determinación del índice de sitio en plantaciones de Costa de Marfil; Chagoya y Vallejo (2003) ponen a disposición de los silvicultores de los países de Latinoamérica y el Caribe unas relaciones fundamentales que facilitan la simulación de decisiones silvícolas en *Cedrela odorata* (edades e intensidades adecuadas para raleos y aclareos, elección del turno etc.); Vega-Condori (1974) establece mediciones del crecimiento en Surinam proponiendo 35 años como edad de corta.

Cedrela odorata puede ser muy demandante en cuanto a sus requisitos de suelo, aunque crece en diferentes ambientes.

En las Antillas y Bahamas se le puede encontrar de manera común en arcillas derivadas de piedra caliza (12), y crece también en sitios bien drenados sobre suelos ácidos derivados de rocas volcánicas (Ultisoles). En México y América Central es común en suelos bien drenados.

La fertilidad del suelo puede ser también importante, ya que se ha encontrado que crece mejor en suelos enriquecidos con restos quemados del bosque secundario.

Los suelos de mayor fertilidad permiten un mejor crecimiento de los individuos (20).

El cedro se desarrolla en una amplia variedad de climas, hallándose en las fajas latitudinales cálidas, mayormente en los trópicos libres de heladas, aunque se ha encontrado en las latitudes 26° N y 28° S, donde se pueden esperar heladas ligeras ocasionales.

Se desarrolla mejor en climas con una estación seca marcada de 2 a 5 meses de duración. Presenta mayor crecimiento bajo una precipitación anual de 1200 a 2400 mm, aunque tolera precipitaciones entre 1000 y 3500 mm (12).

Esta especie está distribuida en selvas y pastizales arbolados de México, Centroamérica, Caribe, Bahamas y en todos los países de Sudamérica, excepto Chile y Uruguay (14, 25).

La buena calidad de su madera ha puesto en riesgo sus poblaciones naturales (está incluida en el apéndice III de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres) y ha promovido su utilización en plantaciones en casi todos los países de América y en muchos de África Tropical (16).

Cada sitio tiene diferente potencial de producción en función del clima y el suelo (31); de acuerdo con lo anterior las plantaciones de *Cedrela odorata* presentan crecimiento acorde a la calidad de sitio en los ambientes estudiados, lo que facilita la construcción de curvas de índice de sitio.

Objetivos

Desarrollar un modelo que permita determinar la calidad del sitio a través de expresiones algebraicas que modelen el crecimiento en altura dominante con base en la edad de los árboles, así como determinar el crecimiento medio anual en volumen de madera de los rodales a la edad de 10 años, para relacionar el índice de sitio con el crecimiento.

La aportación de este estudio es que se podrá aplicar en plantaciones de cedro en zonas de mayores precipitaciones y crecimientos que las analizadas por García-Cuevas *et al.* (2007) y con un mayor rango de edades que el analizado por Bravo-Medel (2007), Galán-Larrea *et al.* (2008), Quintero-Castañeda (2005) y Salazar-García *et al.* (2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos utilizados, instalación e inventario de parcelas

En la selección de las plantaciones de *Cedrela odorata* se buscó obtener una muestra representativa de edades, densidades y calidades de sitio; para ello, se analizó la red de parcelas permanentes, creciendo en suelo arcilloso, franco arcilloso y franco arcilloso-arenoso en nueve municipios (Balancán, Centro, Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Huimanguillo, Nacajuca, Tacotalpa y Teapa) del Estado de Tabasco, México (figura 1). Se consideraron 22 plantaciones con coordenadas al Norte 18°39' N, y al Sur 17°19' N; al Este 91°57' O y al Oeste 94°08' O (22).

La temperatura media anual oscila alrededor de 26°C y las precipitaciones anuales superan los 2000 mm. Existe un período de sequía entre los meses de febrero y mayo.

El manejo silvícola aplicado en estas plantaciones fue: en las plantaciones mayores de 4 ha, fertilización en los primeros tres años, generalmente triple 17 (fertilizante que aporta nitrógeno 17%, fósforo 17% y potasio 17%); en plantaciones de menor superficie generalmente no se aplicó fertilización. La intensidad de deshierbes varió, en la mayoría de las plantaciones se realizó deshierbe manual, en otras, la maleza había llegado a competir fuertemente con los árboles.

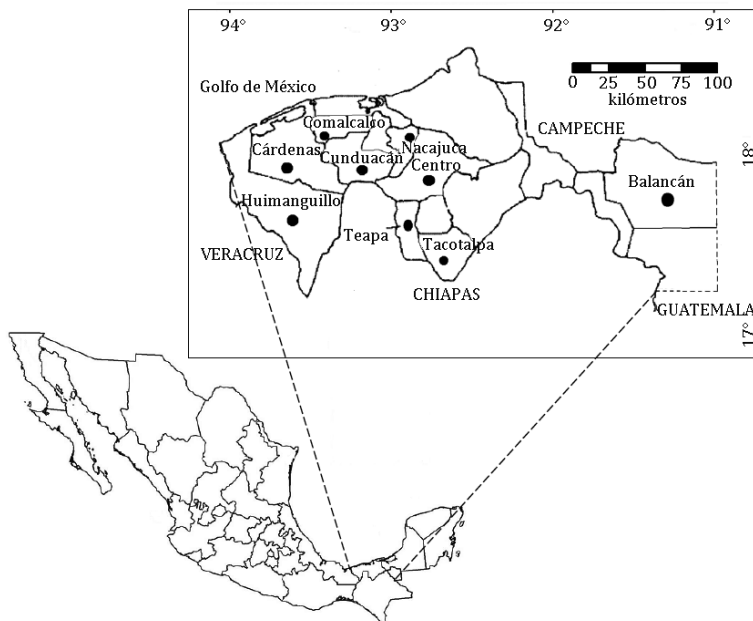


Figura 1. Localización de plantaciones de *C. odorata* en el estado de Tabasco, México.

Figure 1. Location of plantations of *C. odorata* in the state of Tabasco, Mexico.

No se pudo evaluar la influencia de estas diferencias en el manejo sobre el índice de sitio.

No se aplicaron aclareos. Solo se realizó poda de formación o fitosanitaria en árboles jóvenes.

Las mediciones se hicieron en parcelas de 100 árboles para densidades de hasta 3×3 m, y de 1.000 m² para espaciamentos mayores, siguiendo la metodología definida por el programa de seguimiento de plantaciones MIRASILV (36); se realizó en coordinación con la COMESFOR (Comisión Estatal Forestal) en Tabasco en los años 2003, 2004, 2005. Cada año se midieron 77 parcelas y en el año 2007 se midieron 10 de las parcelas anteriores.

El tamaño medio de las plantaciones es 8,7 ha (52,4% menores de 5 ha, 19% entre 6 y 10 ha, y 28,6% mayores de 10 ha).

En cada plantación, de acuerdo con su extensión, se establecieron de 1 a 10 parcelas (3,5 en promedio), conforme a la metodología de MIRASILV (36).

Las parcelas estaban conformadas cada una por 81 árboles en promedio, 283,5 árboles en cada plantación siendo un total de 6.237 árboles medidos.

En cada parcela se registró la superficie y la fecha de plantación.

De cada árbol incluido en la parcela se midió el diámetro normal a la altura de 1,30 m (d) en centímetros con una forcípula y la altura total (h) en metros con una pistola Haga.

Con estos datos se generaron los parámetros diámetro medio, área basal, número de árboles por unidad de superficie, volumen de madera con corteza a partir de las ecuaciones de cubicación del Inventario Forestal del estado de Tabasco (34), altura media de los árboles y altura dominante (h_{dom}), definida como la media de las alturas de los cien árboles más gruesos por hectárea (5, 6) y calculada como la altura media de los n árboles más gruesos de la parcela siendo

$n = S/100$ y S la superficie de la parcela de medición en m².

Determinación del índice de sitio

La clasificación de la calidad de sitio para rodales regulares suele emplear un sistema de curvas de altura dominante en función de la edad del rodal para expresar las diferentes capacidades productivas.

En este caso se eligió construir el índice de sitio a través del método de la curva guía, que de acuerdo con Clutter *et al.* (1983), es una línea promedio que señala el comportamiento de las alturas dominantes en función de la edad.

Para determinar la curva guía se realizaron los ajustes de los modelos clásicos de crecimiento de Schumacher, Gompertz, Hossfeld IV, y los modelos Monomolecular y Logístico (15), (tabla 1, pág. 18) para cuantificar la altura dominante de las plantaciones en función de la edad.

Análisis estadístico

Se aplicó análisis de regresión no lineal, para estimar los parámetros de los modelos de crecimiento en altura de los árboles dominantes.

Los análisis se hicieron con el software estadístico SAS/ETS®, versión 9.1.3 (35), mediante el procedimiento NLIN.

Los modelos se construyeron mediante validación cruzada, distribuyendo los datos de manera aleatoria en cinco grupos del 20% cada uno.

Con cada grupo de datos se realizó la validación del modelo generado con el 80% de datos restantes (27).

Se obtuvo la eficiencia de cada modelo (EF, ecuación 6), el error medio del modelo (MRES, ecuación 7) y la diferencia absoluta media (AMRES, ecuación 8): los cuales son considerados buenos estimadores para evaluar los modelos aplicados con regresiones no lineales (21, 32).

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas para modelar la altura dominante en *Cedrela odorata*.
Table 1. Equations used to model the dominant height in *Cedrela odorata*.

Modelo	Ecuación	Nº de ecuación
Hossfeld IV	$h_{dom} = t^c / (a + b \cdot t^c)$	(1)
Monomolecular	$h_{dom} = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot c \cdot t))$	(2)
Gompertz	$h_{dom} = a \cdot \exp(-b \cdot \exp(-c \cdot t))$	(3)
Logístico	$h_{dom} = a / (1 + b \cdot \exp(-c \cdot t))$	(4)
Schumacher	$h_{dom} = a \cdot \exp(-b/t)$	(5)

h_{dom} = altura dominante (m); t = edad de los árboles (años); a , b y c = parámetros estimados. Fuente: (15).
 h_{dom} = dominant height (m); t = tree age (years); a , b & c = estimated parameters. Source: (15).

La selección del modelo de los cinco generados de cada tipo fue a partir de la eficiencia predictiva, de los errores medios y la diferencia absoluta, el análisis de residuales y el análisis gráfico del ajuste a los datos observados.

A cada modelo se asignó un número de orden para cada indicador estadístico de validación de acuerdo con el mejor resultado (1 al valor más alto para EF, 1 al valor absoluto más bajo para MRES y AMRES, 2 al siguiente etc.) y sumando estos números de orden.

El modelo mejor fue el que presentó un valor sumatorio más bajo.

$$EF = 1 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$MRES = 1 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (7)$$

$$AMRES = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (8)$$

donde:

- y_i = valor observado
- \hat{y}_i = valor estimado con el modelo
- \bar{y}_i = valor promedio de los valores observados o reales.

A partir de la curva guía, ajustada para el conjunto de todas las mediciones, se generó una familia de curvas anamórficas; estas curvas se caracterizan por presentar la misma forma, son proporcionales entre sí, y guardan una relación constante entre la pendiente de la curva de una calidad y la pendiente de otra calidad a cualquier edad, además de que el punto de inflexión lo presentan a la misma edad (10, 18, 26).

Los índices de sitio se definieron con un intervalo de 4 m entre uno y el siguiente, de tal manera que abarcaran el rango de alturas dominantes medidas a la edad base: este intervalo permitió definir tres clases de índice de sitio, separados por tres o más metros.

Para cada índice de sitio se determinó la curva anamórfica que lo representa ajustando un coeficiente de proporcionalidad (CP), a partir de la relación entre la altura que corresponda a la curva guía en la edad base y cada índice de sitio.

La edad base se seleccionó en función de dos criterios: estar cercana a la mitad del turno de corta; y estar plenamente dentro del rango de edades medidas (1, 2).

Determinación del crecimiento en volumen de madera

Se determinó el volumen de los árboles a partir de la ecuación 9 de cubicación elaborada para cedro en el Inventario Forestal del Estado de Tabasco (34).

$$v = \exp(-9,19540026) \times d^{1,64562367} \times h^{1,07521209} \quad (9)$$

donde:

v = volumen total de fuste en metros cúbicos

d = diámetro normal en centímetros

exp = función exponencial

h = altura total del árbol en metros.

Se determinó el crecimiento medio anual en volumen de madera de la plantación ($IMAV$) ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$), a partir de la ecuación 10; el crecimiento anual en volumen del árbol medio de cada parcela ($IMAv$) ($m^3 árbol^{-1} año^{-1}$), a partir de la ecuación 11.

$$IMAV = \frac{\sum_1^n v}{S \times t} \quad (10)$$

$$IMAv = \frac{\sum_1^n v}{n \times t} \quad (11)$$

donde:

v = volumen total de fuste en metros cúbicos de los n árboles de la parcela

S = superficie de la parcela en hectáreas,

n = es el número de árboles de la parcela

t = la edad de la plantación en años

Se analizó la relación de los crecimientos anuales en volumen de madera de

la plantación ($IMAV$) y del árbol medio de la parcela ($IMAv$), con la altura dominante de los rodales (H_{dom}); utilizando datos de los rodales con edades comprendidas entre 9 y 11 años (cerca a la edad de referencia).

Se comprobó la normalidad de los datos; se ajustaron las relaciones mediante regresión lineal con el procedimiento REG de SAS (35).

Los datos que no tuvieron distribución normal se transformaron mediante logaritmos naturales y se ajustaron relaciones potenciales y exponenciales con regresión no lineal, seleccionando la mejor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Valores dasométricos de las parcelas

Las plantaciones de *Cedrela odorata* inventariadas presentaron un rango de edades de 3 a 15 años (tabla 2, pág. 22).

Las distancias de plantación en cedro están entre 1,5×1,5 m, las cuales generan densidades iniciales de 4.444 $árb \cdot ha^{-1}$, hasta 8×8 m con 156 árboles en sistemas agroforestales, principalmente para producir madera aserrada.

Los diámetros promedio varían desde menos de 10 cm hasta 33 cm en las plantaciones de mayor edad.

Las alturas medias son muy diversas en las edades jóvenes, con plantaciones de 3 años que superan los 10 m, mientras que otras de 5 años no alcanzan 6 m de altura, la altura media sobrepasa 21 m en las plantaciones de mayor edad.

Las densidades de plantación tienen un amplio rango, al igual que las reportadas en los países tropicales de América y África donde se cultiva la especie (12), salvo que en Tabasco son frecuentes espaciamientos superiores a 4×4 m, asociados a sistemas agroforestales.

Los diámetros y las alturas están en el rango medio-superior de los reportados por la autora citada.

Tabla 2. Variables dasométricas de árbol y de masa, en plantaciones de *C. odorata* en Tabasco, México.
Table 2. Dasometric variables of tree and stand, in plantations of *C. odorata* in Tabasco, Mexico.

Plantación	Municipio	Edad (años)	Dap promedio (cm)	Altura total promedio (m)	Área basal promedio (m ² ha ⁻¹)	Volumen promedio (m ³ árbol ⁻¹)	Densidad arbolado (árbol ha ⁻¹)	Altura dominante (m)
27-031	Cunduacán	3	12,45	10,15	15	0,070	1,415	11,09
27-032	Balancán	3	10,51	8,57	7	0,039	768	9,54
27-030	Cunduacán	4	11,48	8,06	6	0,042	586	8,21
27-035	Cunduacán	4	10,81	9,02	9	0,055	613	12,00
27-044	Tacotalpa	4	10,08	9,53	5	0,041	684	11,18
27-011	Nacajuca	5	7,78	5,52	3	0,015	522	7,67
27-043	Centro	6	10,02	8,36	9	0,039	1,099	11,00
27-002	Cunduacán	7	19,48	12,68	19	0,201	621	14,00
27-005	Cunduacán	7	9,26	9,87	12	0,062	1,280	17,63
27-038	Cunduacán	8	20,15	12,83	9	0,212	427	12,97
27-018	Cárdenas	8	19,78	12,99	7	0,244	197	14,29
27-003	Cunduacán	9	13,23	11,86	16	0,103	1,049	14,36
27-001	Cunduacán	9	19,47	12,72	12	0,204	387	13,63
27-022	Huimanguillo	10	21,24	15,37	17	0,265	511	17,59
27-015	Teapa	10	29,09	18,15	12	0,630	171	19,06
27-040	Cunduacán	11	21,50	11,28	7	0,346	149	14,68
27-021	Comalcalco	11	15,06	11,06	12	0,110	701	13,58
27-050	Cunduacán	12	13,19	11,40	14	0,092	718	14,58
27-033	Cunduacán	12	21,94	16,18	6	0,358	132	17,04
27-012	Comalcalco	12	19,42	13,87	5	0,223	165	14,93
27-028	Comalcalco	13	17,98	11,31	15	0,161	569	12,38
27-007	Cunduacán	15	33,60	21,59	13	1,081	133	22,06

Nota: El volumen promedio se calculó para cada parcela con el modelo propuesto por SARH (34).

La altura dominante es la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea (6).

Note: Average volume was calculated for each plot with the model proposed by SARH (34).

The dominant height is the mean height of the 100 thickest trees per hectare (6).

No se pudo cuantificar la influencia de las diferencias en el manejo (fertilización y deshierbe de las plantaciones) sobre la calidad de la plantación. Al respecto, Martínez-Zurimendi *et al.* (2015) mencionan que en la calidad de la plantación intervienen factores diferentes de la calidad de sitio, tales como el material genético, la preparación del terreno y el manejo de la plantación.

Si se mejora el manejo silvícola, por ejemplo, con una mejor preparación del terreno y una fertilización más adecuada, puede incrementarse la altura de los árboles y su producción.

Ajuste de los modelos de altura dominante

El modelo que presentó mejor ajuste por el resultado del ANOVA fue el de Hossfeld IV (tabla 3).

El análisis gráfico de las curvas guía (figura 2, pág. 24) indica que los modelos Hossfeld IV, Monomolecular, Logístico y Gompertz tienen buen ajuste y son prácticamente coincidentes de 2 a 12 años, mientras que el modelo de Schumacher presenta peor ajuste.

Para edades superiores a los doce años en el modelo de Hossfeld IV la altura dominante continúa creciendo de manera constante como se aprecia en las plantaciones de mayor edad, mientras que en los otros tres modelos, la altura dominante presenta un crecimiento que va disminuyendo con la edad, ajustándose a una asíntota, acorde con la observación del crecimiento de la especie.

El modelo fue preciso, indicando la inexistencia de heterocedasticidad y no presentó valores atípicos.

Validación de los modelos

De los cinco modelos, el que mejor eficiencia presentó fue el de Hossfeld IV, seguido del Monomolecular (tabla 4, pág. 24), y con los modelos de Gompertz y Logístico se obtuvieron eficiencias muy próximas a la máxima.

Los valores de AMRES fueron altos y muy similares para todos los modelos observados, lo cual indica que se ha cubierto de manera amplia la gran variabilidad de las condiciones de sitio. Sin embargo, el valor de MRES fue más favorable en el modelo Monomolecular que en Hossfeld IV.

Tabla 3. Análisis de varianza y parámetros estimados por regresión no lineal para la altura dominante con los modelos para *C. odorata* ajustados con todos los datos.

Table 3. Analysis of variance and parameters estimated by non-linear regression for the dominant height with the models for *C. odorata* fitted with all of the data.

Modelo	GL modelo	GL error	Aprox Pr>F		a	b	c
Hossfeld IV	3	219	<0,0001	Estimador	0,3858	-0,2229	0,1215
				Error estadístico aprox.	0,4067	0,4173	0,1641
Monomolecular	2	219	<0,0001	Estimador	31,5589	-0,1863	0,0435
				Error estadístico aprox.	13,4925	0,0722	0,0298
Gompertz	3	219	<0,0001	Estimador	-3,2021	1,4254	0,1008
				Error estadístico aprox.	0,2120	0,1645	0,0306
Logístico	3	219	<0,0001	Estimador	22,7499	2,6070	0,1544
				Error estadístico aprox.	3,7413	0,4629	0,0317
Schumacher	2	220	<0,0001	Estimador	16,4185	1,5772	
				Error estadístico aprox.	0,3944	0,1355	

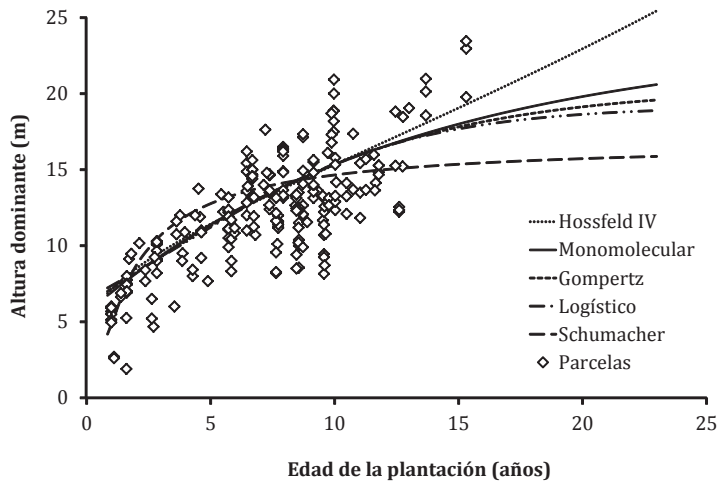


Figura 2. Curvas guía ajustadas de los cinco modelos ensayados y dispersión de los valores medidos en las parcelas de *C. odorata* en Tabasco.

Figure 2. Guide curves of the five models assayed and distribution of the mean values in the plots of *C. odorata* in Tabasco.

Tabla 4. Eficiencia, error medio y diferencia absoluta media de los modelos de altura dominante para *Cedrela odorata*.

Table 4. Efficiency, mean error and mean absolute difference of the models of dominant height for *Cedrela odorata*.

Modelos	Eficiencia (EF)	Número de orden	MRES	Número de orden	AMRES	Número de orden	Suma de números de orden
Hossfeld IV	0,5705	1	-0,0156	4	1,8729	1	6
Monomolecular	0,5590	2	-0,0011	2	1,9099	2	6
Gompertz	0,5521	3	0,0006	1	1,9327	3	7
Logístico	0,5450	4	0,0021	3	1,9537	4	11
Schumacher	0,5035	5	-0,0398	5	1,9678	5	15

Los residuales del modelo Hossfeld IV manifiestan distribución normal (figura 3, pág. 25) frente a la variable independiente y buen ajuste de 3 a 12 años, aunque tienden a sobrevalorar la altura dominante a edades tempranas (0-3 años) y a subvalorarla a edades superiores (13-16 años).

El sesgo detectado en el modelo en edades superiores a 12 años, se debe a que las plantaciones de mayor edad evaluadas pertenecen a calidades de sitio media y alta.

Las plantaciones de edades intermedias estuvieron ampliamente repartidas entre todas las calidades.

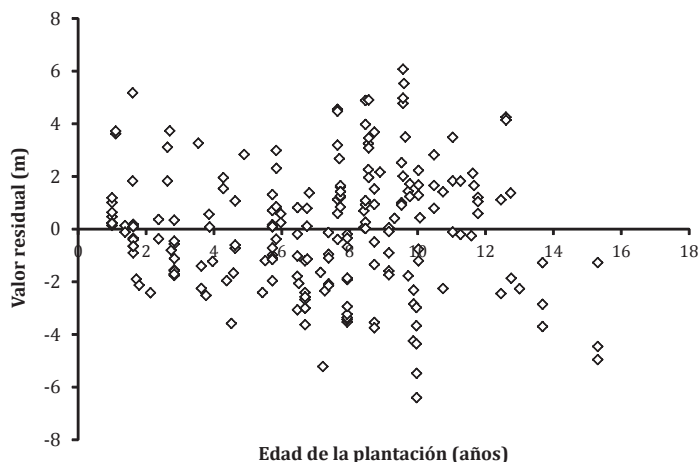


Figura 3. Valores residuales obtenidos en la validación del modelo Hossfeld IV en plantaciones de *C. odorata* en Tabasco, México.

Figure 3. Residual values obtained in the validation of the Hossfeld IV model in plantations of *C. odorata* in Tabasco, Mexico.

La normalidad de los residuos se determinó con la prueba de Kolmogorov - Smirnov.

El ajuste lineal de los residuales del modelo contra la variable predictora presenta rectas casi horizontales próximas al eje de la X (37).

Se eligió el modelo Hossfeld IV por su mayor ajuste algebraico, además de que presenta una predicción del crecimiento acorde con el crecimiento característico de la especie en edades juveniles.

El Modelo Hossfeld IV se ajusta mejor a la evolución de las parcelas (figura 4, pág. 27).

El ámbito de utilidad del modelo es para mediciones realizadas entre 4 y 12 años: las predicciones del índice de sitio a partir de mediciones realizadas los años 1 a 3 dan valores inferiores a los medidos; a partir de 4 años de edad, hasta 12 años, el modelo se ajusta a las mediciones observadas; a partir de 12 años de edad

las previsiones del modelo deben tomarse como un valor estimativo.

García Cuevas *et al.* (2007) también recomiendan no aplicar los modelos a plantaciones muy jóvenes por la posibilidad de introducir un fuerte error.

Índice de sitio

Se seleccionó el modelo Hossfeld IV, y ajustado con todos los datos se obtuvo la ecuación 12:

$$h_{dom} = t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215}) \quad (12)$$

donde:

h_{dom} = altura dominante en metros

t = edad del rodal en años

El valor del índice de sitio promedio para el conjunto de las plantaciones de *C. odorata* en Tabasco fue 14,59 m de altura dominante a la edad de 10 años.

Las plantaciones presentaron índices de sitio muy variables, desde 8 hasta 22 m. Esta variabilidad tan importante en la altura dominante expresó un amplio rango en la potencialidad productiva de los sitios, por lo que será imprescindible considerar la calidad del sitio de cada plantación en la silvicultura que se aplique.

Con la amplitud existente en el índice de sitio se consideró adecuada la separación de tres calidades con 4 m, de diferencia, definiéndose el valor medio del IS para esas calidades: 11, 15 y 19 m de altura dominante a los 10 años de edad de referencia (ecuaciones 13 a 15).

Los modelos se concretaron en las siguientes expresiones algebraicas:

Calidad de sitio I:

$$h_{dom} = 0,7562 \cdot t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215}) \quad (13)$$

Calidad de sitio II:

$$h_{dom} = 1,0313 \cdot t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215}) \quad (14)$$

Calidad de sitio III:

$$h_{dom} = 1,0363 \cdot t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215}) \quad (15)$$

Las plantaciones quedaron representadas en tres clases de calidad de sitio: 11 m para la calidad baja, 15 m para la calidad media y 19 m para la calidad alta (figura 4, pág. 27).

El 25,1% de las parcelas inventariadas correspondió a la calidad baja (IS < 13 m), el 52,1% a la calidad media (IS > 13m; IS < 17 m) y el 22,8% a la calidad alta (IS > 17 m).

A partir de los resultados anteriores, el modelo general de altura dominante en función del índice de sitio y de la edad para *Cedrela odorata* se puede expresar de la siguiente manera (ecuación 16):

$$h_{dom} = 0,0688 \cdot IS \cdot t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215}) \quad (16)$$

A través del despeje matemático de la ecuación anterior es posible estimar el IS para una plantación con la altura dominante y la edad (ecuación 17).

$$IS = 14,5454 \cdot h_{dom} / (t^{0,1215} / (0,3858 - 0,2229 \cdot t^{0,1215})) \quad (17)$$

El crecimiento inicial en altura es vigoroso y característico de la especie y ha sido descrito en muchos lugares de su área de distribución: Venezuela (4), Nicaragua (3), Panamá (20, 28).

En Tabasco, según la calidad de sitio, se predicen alturas dominantes de 6 a 15 m a los cinco años, mientras que en Veracruz, México, Salazar-García *et al.* (2012) predicen de 2 a 14 m a esa edad, con crecimiento ligeramente inferior.

Los índices de sitio reportados por Galán-Larrea *et al.* (2008) para Oaxaca, en plantaciones de enriquecimiento de vegetación secundaria, son notoriamente más altos, de 14 a 26 m a la misma edad base, aunque las mediciones estaban comprendidas entre 14 y 18 m, que corresponden a las calidades media y superior de Tabasco.

Las calidades baja y alta presentan altura dominante de 14,5 y 25,5 m a los 20 años, respectivamente; superiores a las que reportan García-Cuevas *et al.* (2007) para Quintana Roo, México: de 10 a 18 m a los 20 años.

Los modelos se han realizado con muestras de plantaciones con edades hasta los 15 años. Sin embargo en la modelización que se propone, la asignación de alturas dominantes a edades superiores a los 12 años debe usarse como estimativa y solo con nuevas mediciones a mayores edades se podrá determinar si el modelo sigue siendo útil y se ajusta al comportamiento de la especie.

Hubiera sido conveniente contar con plantaciones de edad superior a 15 años para tener más ampliamente representado el turno de la especie. Esta herramienta deberá ser mejorada en el futuro, ampliando el rango de los datos, lo que permitirá mejorar el ajuste de las curvas y ampliar el rango de edades de su aplicación.

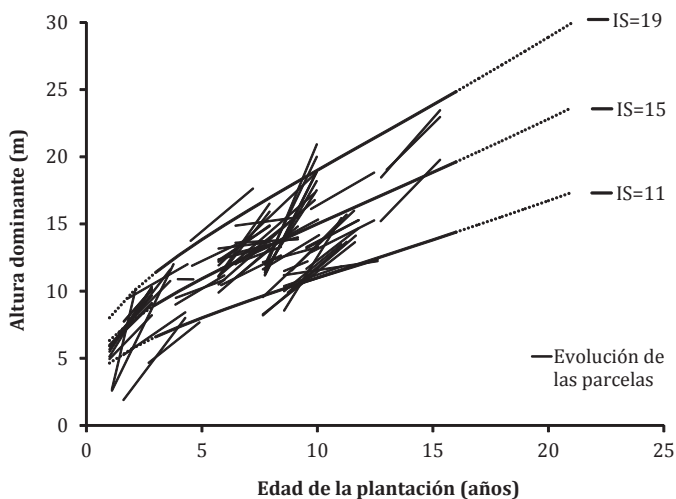


Figura 4. Curvas anamórficas de altura dominante con el modelo de Hossfeld IV para tres clases de índice de sitio, con relación a las edades de las plantaciones de *C. odorata* en Tabasco, México.

Figure 4. Anamorphic curves of dominant height with HossfeldIV model for three classes of site index, related to the ages of plantations of *C. odorata* in Tabasco, Mexico.

Crecimiento en volumen de madera

La altura dominante de las parcelas (h_{dom}) y el incremento medio anual en volumen de las plantaciones (*IMAV*) presentaron una distribución normal. *IMAV* se relaciona de manera lineal (ecuación 18) con la altura dominante ($R^2 = 0,70$).

$$IMAV = -9,4497 + 1,4229 \cdot h_{dom} \quad (18)$$

El incremento medio anual en volumen del árbol medio (*IMAv*) no presentó una distribución normal de los datos, estos se transformaron mediante logaritmo natural y se ajustaron las relaciones potencial ($R^2 = 0,82$) y exponencial ($R^2 = 0,84$), que resultó la mejor (ecuación 19).

$$IMAv = 0,0009564 \cdot \exp(0,20802 \cdot h_{dom}) \quad (19)$$

La altura dominante máxima determinada en las plantaciones fue 20,73 m a los 10 años de edad (figura 5, pág. 28); en la misma calidad se obtuvo un crecimiento medio de $21,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; la altura dominante mínima reportada a los diez años fue 8,14 m, el crecimiento medio en esa plantación fue de $1,40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Se dio una relación funcional entre la altura dominante de las plantaciones y la producción de madera.

Los crecimientos medidos tienen un rango más amplio del usualmente reportado para la especie.

Galán-Larrea *et al.* (2008) reportan *IMAV* de 2,1 a $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en plantaciones de enriquecimiento de acahuales con *C. odorata* en Oaxaca, en densidades bajas de arbolado, e IS_{10} de 14 a 26 m.

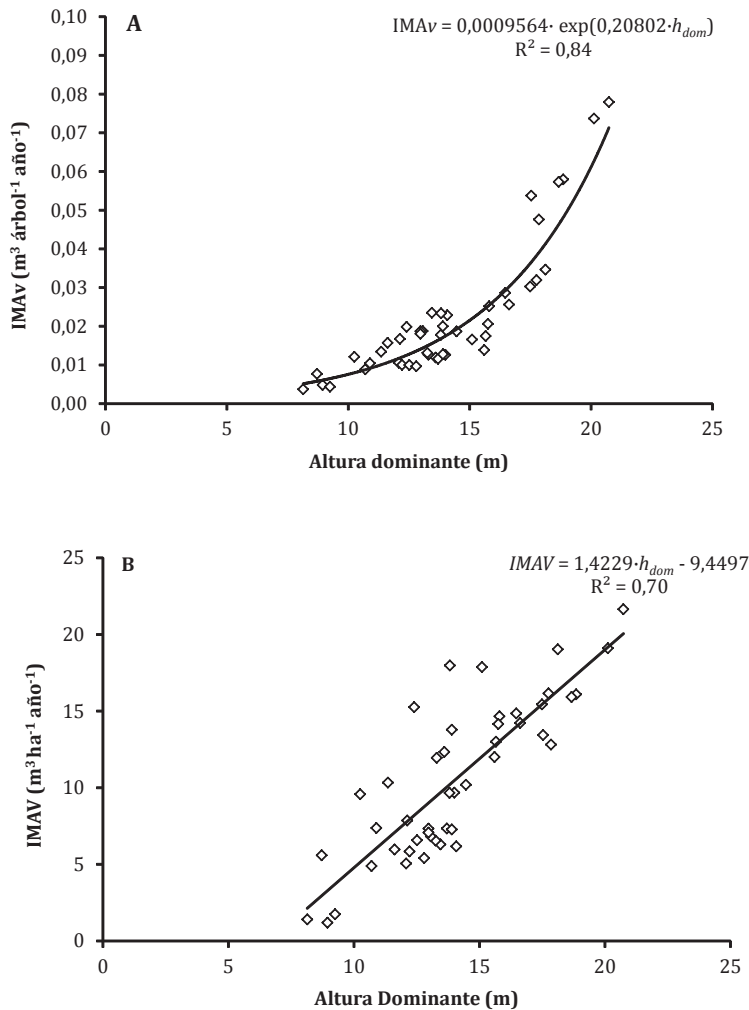


Figura 5. A: Incremento medio anual en volumen de madera del árbol (*IMAv*). B: Incremento medio anual en volumen de madera por hectárea (*IMAV*), en función de la altura dominante (h_{dom}) en las plantaciones de *C. odorata*, en plantaciones de 9 a 11 años de edad (la edad de referencia \pm 1 año).

Figure 5. A: Annual mean increase in volume of tree wood (*IMAv*, by its Spanish abbreviation). B: Annual mean increase in volume of stand (*IMAV*, by its Spanish abbreviation) as a function of dominant height (h_{dom}) in the plantations of *C. odorata*, in plantations of 9 to 11 years of age (age of reference \pm 1 year).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos se pudieron desarrollar modelos que permiten determinar la calidad del sitio a partir de la altura dominante y la edad de la plantación. De los modelos de Hossfeld IV, Monomolecular, Gompertz, Logístico y Schumacher, el primero es el que mejor se ajusta a la evolución de la altura dominante con base en la edad en las plantaciones de *Cedrela odorata* en Tabasco.

Se definen tres clases de calidad de sitio para expresar la potencialidad productiva de la región estudiada: baja (11 m de altura dominante a los 10 años de edad), media (15 m) y alta (19 m). Este modelo puede aplicarse eficazmente en plantaciones de *Cedrela odorata* del

estado de Tabasco en el rango de edades de 4 a 12 años.

También se pudo determinar el crecimiento medio anual en volumen de madera de los rodales a la edad de 10 años, mediante una ecuación predictiva en función de la altura dominante.

La variación de calidades de sitio entre las plantaciones (8 a 22 m de altura dominante a los 10 años de edad) corresponde a un amplio rango de producciones maderables de 1,40 a 21,65 m³·ha⁻¹·año⁻¹ a esa misma edad. La determinación de los índices de sitio servirá para seleccionar las mejores condiciones para el establecimiento y desarrollo de plantaciones de *Cedrela odorata*.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Vol. 2 - Predicción del rendimiento. Roma. Estudio FAO. Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 118 p.
2. Álvarez-González, J. G.; Barrio-Anta, M.; Diéguez-Aranda, U.; Rojo-Alboreca, A. 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 18: 303-309.
3. Andrés, P.; Salgado, C.; Espelta, J. M. 2011. Optimizing nursery and plantation methods to grow *Cedrela odorata* seedlings in tropical dry agroecosystems. *Agroforestry Systems*. 83 (2): 225-234.
4. Araque, O.; Jaimez, R. E.; Azócar, C.; Espinoza, W.; Tezara W. 2009. Relations between foliar anatomy, gas exchange and growth in juveniles of four forest species. *Interciencia*. 10(34): 725-729.
5. Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. New York, USA. Oxford Pergamon Press. 506 p.
6. Bengoa, J. L. 1999 Estimación de la altura dominante de la masa a partir de la "altura dominante de parcela". Ventajas frente a la altura dominante de Assman. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales Fuera de Serie*. 1: 311-321.
7. Bravo-Medel, A. 2007. Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México. 86 p.
8. Bravo-Oviedo, A.; Del Río, M.; Montero, G. 2004. Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *Forest Ecology and Management*. 201: 187-197.
9. Cajander, A. K. 1926. The theory of forest types. *Acta Forestalia Fennica*. 29: 1-108.
10. Carrero, O.; Mauricio, J.; Macchiavelli, R.; Orlandoni, G.; Stock, J. 2008. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia*. 33(4): 265-272.
11. Chagoya, J.; Vallejo, A. 2003. Curvas de crecimiento de *Cedrela odorata* en sistema de manejo forestal. SILVIA Ver. 2.5.0. CATIE, Costa Rica. Disponible en: <http://www.catie.ac.cr/silvia.html>. (Accessed October 2011).

12. Cintron, B. B. 2000. *Cedrela odorata* L. Cedro hembra, Spanish cedar. In: Francis, J. K.; Lowe, C. A. (Eds.), S. Trabanino (trad.) *Bioecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*. Río Piedras, Puerto Rico. Gen. Tech. Rep. IITF-15. U.S. D.A. Forest Service. 250-257.
13. Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienar, L. V.; Brister, G. H.; Bailey, R. L. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. New York, U.S.A. John Wiley and Sons, Inc. 333 p.
14. Cordero, J.; Boshier, D. (eds.) 2003. *Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas*. Turrialba, CR, OFI/CATIE. 1079 p.
15. Corral-Rivas, S.; Návar-Cháidez, J. de J. 2005. Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosques* 11 (1): 29-47.
16. Dupuy, B.; Mille, G. 1993. *Timber plantations in the humid tropics of Africa*. Roma, Italia. FA.O. 190 p.
17. Galán-Larrea, R.; de los Santos-Posadas, H. M.; Valdez-Hernández, J. I. 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.
18. García, O. 2006. Site index: concepts and methods. In Cieszewski, C. J.; Strub, M. (Eds.) *Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management and the 2004 Southern Mensurationists Meeting*. Hot Springs, Arkansas, USA: Warnell School of Forestry and Natural Resources, University of Georgia. 275-283.
19. García-Cuevas, X.; Flores, J. G.; Benavides J.D. 2007. Índice de sitio para cedro (*Cedrela odorata* L.) en Quintana Roo, México. *Ciencia Forestal en México*. 32(101): 71-92.
20. Hall, J. S.; Love, B. E.; Garen, E. J.; Slusser, J. L.; Saltonstall, K.; Mathias, S.; Ashton, M. S. 2011. Tree plantations on farms: Evaluating growth and potential for success. *Forest Ecology and Management*. 261(10): 1675-1683.
21. Huang, S.; Yang, Y.; Wang, Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: Amaro, A.; Redd, A.; Soares, P. (Eds.) *Modelling Forest Systems*. Wallingford, UK: CAB International. 271-293.
22. INEGI 2012. *Anuario Estadístico de Tabasco*. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 426p.
23. Martínez-Zurimendi, P.; Domínguez-Domínguez, M.; Juárez-García, A.; López-López, L.M.; De la Cruz-Arias, V. y Álvarez-Martínez, J. 2015. Índice de sitio y producción de madera en plantaciones forestales comerciales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 38(4): 415-425.
24. Ortega, A. y Montero, G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. *Revisión bibliográfica*. *Ecología*. 2: 155-184.
25. Pennington, T.; Styles, B.; Taylor, D. 1981. *Meliaceae. Flora Neotrópica*. New York, USA. Monografía 28: New York Botanical Garden. 440 p.
26. Pérez-González, G.; Domínguez-Domínguez, M.; Martínez-Zurimendi, P.; Etchevers-Barra J. D. 2012. Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*. 18(1): 7-24.
27. Picard, N.; Saint-André, L.; Henry, M. 2012. *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Roma. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y El Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. 223 p.
28. Plath, M.; Mody, K.; Potvin, C.; Dorn, S. 2011. Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: Small-scale effects on tree performance and insect herbivory. *Forest Ecology and Management*. 261(3): 741-750.
29. Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F.; Real, P. 1997. *Mensura forestal*. San José, C.R. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH – Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (DCA). 586 p.
30. Quintero-Castañeda, H. 2005. Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones en San José Chacalapa, Pochutla Oaxaca. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 81 p.
31. Raebild, A.; Meilby, H. 2006. Cálculo de tablas volumétricas y tablas de crecimiento. Informe técnico Proyecto FOMABO N2. Cochabamba, Bolivia. Escuela de Ciencias Forestales-ESFOR. 17 p.

32. Rodríguez-Toro, A.; Rubilar-Pons, R.; Muñoz-Sáez, F.; Cártes-Rodríguez, E.; Acuña-Carmona, E.; Cancino-Cancino, J. 2016. Modelo de ahusamiento para *Eucalyptus nitens*, en suelos de cenizas volcánicas de la región de La Araucanía (Chile). Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 48(1): 101-114.
33. Salazar-García, J. G.; Santiago-Trinidad, O.; Sánchez-Monsalvo, V.; Monroy Rivera, C.; Couttolenc-Brenis, E. 2012. Modelo para determinar calidad de sitio a edades tempranas de cuatro especies tropicales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 3(11): 71-80.
34. SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1984. Inventario Forestal del estado de Tabasco. Pub. Esp. 54. México, D.F. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 87 p.
35. SAS (Statistical Analysis Software). 2003. User's Guide, version 9.1.3. Cary, North Carolina. USA. SAS Institute Inc. s/p.
36. Ugalde-Arias, L. 2001. Guía para el establecimiento y medición de parcelas para el monitoreo y evaluación del crecimiento de árboles en investigación y en programas de reforestación con la metodología del sistema MIRASILV. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 14 p.
37. Vanclay, J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. Wallingford, UK. CAB International. 312 p.
38. Vega-Condori, L. 1974. Influencia de la silvicultura sobre el comportamiento de *Cedrela* en Surinam. Boletín Instituto Forestal Latinoamericano. 46-48: 57-86.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con financiamiento de la Fundación Produce, Tabasco. La Comisión Estatal Forestal (COMESFOR) de Tabasco, México, apoyó en las labores de inventario y aportó su base de datos.