

ÍNDICE DE SITIO PARA CAOBA (*Swietenia macrophylla* King) EN QUINTANA ROO, MÉXICO

Xavier García Cuevas¹, Hugo Ramírez Maldonado², Carlos Rodríguez Franco³
Jesús Jasso Mata⁴, Carlos A. Ortiz Solorio⁵

RESUMEN

La investigación se realizó en Quintana Roo, México con el objeto de ajustar los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull a través del Método de la Curva Guía para desarrollar ecuaciones anamórficas y polimórficas de índice de sitio para plantaciones puras de caoba (*Swietenia macrophylla* King). Los resultados indicaron que el modelo con mejor bondad de ajuste con base en los estadísticos, Cuadrado Medio del Error (CME), Pseudo R^2 (R^2), y análisis de residuales y que representa más fielmente el diagrama de dispersión de datos observados, es el de Chapman-Richards en su versión anamórfica.

Palabras clave: *Swietenia macrophylla* King, índice de sitio, modelos de: Schumacher, Chapman-Richards y Weibull.

ABSTRACT

This study was carried out at Quintana Roo State, Mexico. The aim of this study was to apply the Schumacher, Chapman-Richards and Weibull models and the Curve Guide Method to develop anamorphic and polymorphic site index equations for pure plantations of mahogany (*Swietenia macrophylla* King). Results indicate that the model of best fitness based on the Square Means Error (SME), Pseudo R^2 (R^2), residual analysis, and that provides the most accurate diagram of dispersion and observed data, is the Chapman-Richards anamorphic version.

Key words: *Swietenia macrophylla* King, site index, Schumacher, Chapman-Richards and Weibull models.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la importancia que la caoba representa para la economía de los trópicos, sobre todo en Quintana Roo, se carece de información cuantitativa sobre el crecimiento, incremento, desarrollo y rendimiento de la especie, tanto en masas naturales como en plantaciones. Sin embargo, para el manejo de este recurso, es básico la clasificación de la capacidad productiva de los suelos forestales para la especie en la zona. Para ello, el método más empleado es determinar el índice de sitio, debido a su fácil aplicación y utilidad práctica en la evaluación de la productividad de sitios, imprescindible para programas eficientes, especialmente ante el auge de las plantaciones forestales comerciales en México. Una de las técnicas más utilizadas al carecer de análisis troncales o de sitios permanentes de investigación es el ajuste de ecuaciones

que estimen la relación funcional "altura dominante – edad" mediante el método de la curva guía, con lo que estamos en posibilidad de construir familias de curvas de índice de sitio en sus versiones anamórficas o polimórficas, con el fin de calificar la productividad de los sitios.

ANTECEDENTES

Calidad de sitio

La calidad de sitio o de estación se define como la capacidad o las características que determinan en forma un tanto relativa, el grado de productividad de un lugar, bajo las condiciones que interactúan en su medio, al considerar que tal productividad es resultante de la suma de todos los efectos de los factores del sitio (Spurr y Barnes, 1980; Zepeda y Rivero, 1984), como los edáficos, climáticos, bióticos y genéticos. La calidad o productividad de un sitio puede ser

¹ Investigador Titular. Campo Experimental "San Felipe Bacalar", Quintana Roo, México. INIFAP - SAGAR .
correo-e: sfb@cirse.inifap.conacyt.mx

² Profesor – Investigador. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México.

³ Director General Forestal. INIFAP – SAGAR

⁴ Profesor – Investigador. Director del Campus Tabasco. Colegio de Postgraduados. Huimanguillo, Tabasco, México

⁵ Profesor – Investigador. Programa de Edafología. IRENAT - Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México

considerada en términos de la producción potencial maderable para una especie o tipo de bosque específico. Esta productividad es relativa de acuerdo a la especie considerada, de manera que un área representa un alto potencial productivo para una especie y un bajo potencial para otra (Clutter *et al.*, 1982).

Índice de sitio

Los métodos de evaluación de la calidad de sitio, al igual que las técnicas para su determinación han evolucionado hasta tener en la actualidad varios sistemas de clasificación de utilidad de acuerdo a sus objetivos (Pritchett y Fisher, 1987). El índice de sitio es uno de los métodos más empleados para determinar la productividad de los sitios en masas coetáneas preferentemente puras, con base en relaciones de altura dominante-edad, definiéndose como la altura dominante alcanzada por un rodal coetáneo a una edad de referencia o edad base determinada (Zepeda y Rivero, 1984). La altura de un rodal uniforme, a una edad determinada, es un buen indicador del potencial productivo de ese tipo de bosque en el sitio particular, pero se considera que la altura promedio de un rodal es afectada por la edad y calidad de sitio, así como por la densidad del rodal, por ello, se usa normalmente la altura dominante de un rodal coetáneo a una determinada edad, ya que es el mejor indicador del potencial productivo de ese tipo de bosque en un sitio en particular, puesto que es una variable que se considera no afectada por la densidad (Alder, 1980). La altura dominante deja de ser un buen indicador de la calidad de sitio en rodales jóvenes de especies de muy rápido crecimiento, como en los trópicos, o de ciertas especies de gran variabilidad en sus patrones de crecimiento. Lo anterior se detecta al ordenar los datos de parcelas en alturas por clases de edad. Si la agrupación de las parcelas por clases de edad muestran un comportamiento lógico, se tiene un indicador de que la altura dominante es un buen indicador de la calidad de sitio (Alder, 1980).

Funciones de crecimiento para determinar índice de sitio

Las funciones más utilizadas para estimar crecimiento y rendimiento han sido los modelos de Schumacher, Chapman - Richards y Weibull, principalmente al modelar

altura dominante y construir curvas de índice de sitio (Ramírez, 1981).

Tipos de curvas de índice de sitio

Dentro de la determinación de índice de sitio se reconocen dos variantes, según sea la naturaleza de las familias de curvas de altura - edad generadas: a) curvas anamórficas y b) curvas polimórficas. Estas últimas se dividen en articuladas y no articuladas (Clutter *et al.*, 1983; Zepeda y Rivero, 1984). Una familia de curvas, consiste en la construcción de un sistema de curvas de crecimiento en altura, que representan dicho comportamiento para diferentes calidades de estación y durante la vida del rodal (Stage, 1963).

Curvas anamórficas. Las curvas anamórficas se caracterizan por presentar la misma forma, ya que son proporcionales, la pendiente de la altura de las curvas a cualquier edad guarda una relación constante entre ellas (Clutter *et al.*, 1980) y tienen un punto de inflexión a la misma edad para todas ellas. Es decir, las curvas de índice de sitio son anamórficas si hay una tasa relativa de crecimiento constante para todos los índices de sitio a una edad específica y el punto de inflexión es en la misma edad para todas ellas (Zepeda y Rivero, 1984). Cuando estas curvas se representan en escala logarítmica, son rectas paralelas, con igual pendiente pero con diferente ordenada al origen.

Curvas polimórficas. Estas curvas son familias de curvas con pendiente variable que generalmente no guardan una relación de paralelismo entre ellas y no son proporcionales por no depender unas de otras; por esto sus puntos de inflexión ocurren a edades diferentes. En ellas se observa que el crecimiento en altura culmina más pronto en sitios de buena calidad (Clutter *et al.*, 1980; Zepeda y Rivero, 1984; Acosta, 1991). Por lo anterior, la tasa relativa de crecimiento no es constante para todos los índices de sitio, lo que significa que esa tasa es variable para cada edad. Las curvas polimórficas al no ser proporcionales unas a otras indican que existen distintos hábitos de crecimiento para las diferentes clases de índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

Las curvas polimórficas pueden ser articuladas o no articuladas. Las articuladas guardan una determinada relación, aunque

no proporcional y éstas no llegan a cruzarse en el espacio de los rangos de edades de interés analizadas; mientras que las no articuladas carecen de relación entre ellas y es posible que se crucen dentro del rango de interés (Clutter *et al.*, 1983).

Métodos para construir familias de curvas de índice de sitio

Existen diversos métodos generales para construir curvas de índice de sitio, mismas que utilizan información proveniente de parcelas temporales, parcelas permanentes y análisis troncales (Clutter *et al.*, 1983). La construcción de curvas se realiza por métodos gráficos o analíticos, ambos procedimientos se emplean tanto para curvas anamórficas como polimórficas (Curtis, 1964; Alder, 1980; Clutter *et al.*, 1984). Como el índice de sitio es una representación gráfica que describe la relación altura dominante - edad de un rodal, para modelar dicha relación, existen diferentes modelos y técnicas de ajuste de los mismos. La mayoría de las técnicas se encuadran en los métodos: a) de la curva guía, b) de la diferencia algebraica, c) de la predicción de parámetros (Clutter *et al.*, 1984) y d) de ecuaciones diferenciales (Devan y Burkhart, 1982).

Método de la curva guía

El método genera curvas de índice de sitio de tipo anamórficas o polimórficas. La técnica consiste en ajustar un modelo para obtener una curva promedio o curva guía en todo el rango de observaciones altura dominante - edad, a partir de la cual se trazan curvas proporcionales arriba y abajo de la curva guía, al representar diferentes índices de sitio. Los datos de altura dominante - edad son obtenidos de una variedad de rodales de diferentes edades y calidades de estación (Clutter *et al.*, 1984).

Curvas anamórficas con método de curva guía. Las familias de curvas anamórficas o polimórficas se construyen despejando los parámetros de valor asintótico o de forma de los modelos, ya que éstos determinan el tipo de familias de curvas. Para las curvas anamórficas, de la ecuación de índice de sitio se despeja el parámetro asintótico y su expresión se sustituye en la ecuación original, con lo que el valor asintótico se considera implícito, y el o los parámetros de forma, son comunes para todos los sitios. Variando la edad y el índice de sitio deseado

y manteniendo constante la edad base, se genera la familia de curvas anamórficas. Lo anterior se resume en los siguientes pasos y las ecuaciones se presentan en el Cuadro 1 donde:

- Las ecuaciones de crecimiento en su forma integral se ajustan a la base de datos para generar la curva guía.
- Cuando la edad (E) se iguala a la edad base (E_0), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS).
- Como β_1 es un parámetro dependiente del sitio y el IS es igual a la altura dominante a la edad base, para graficar la familia de curvas, se despeja β_1 de la ecuación y su expresión se sustituye en las ecuaciones integrales, obteniendo la expresión para generar las familias de curvas anamórficas, sustituyendo las etiquetas del índice de sitio deseado, mismas que deben estar acordes con la dispersión de datos observados.
- Para calificar la calidad de sitio de un rodal determinado, conocida la edad y la altura dominante, se despeja IS de las ecuaciones que generan las familias de curvas, con la que se obtiene las expresiones con las que es posible calificar el índice de sitio para un rodal específico.

Curvas polimórficas con método de curva guía. A diferencia de las curvas anamórficas, donde para generar las familias de curvas se considera implícita la asíntota, en este caso, como los β 's de los exponentes son parámetros dependientes del sitio y representan la velocidad de crecimiento y el IS es igual a la altura a la edad base, para graficar la familia de curvas polimórficas de las ecuaciones anteriores, se despeja alguno de los β 's de los exponentes y se obtienen las ecuaciones que adoptan las expresiones que se observan en el Cuadro 1, las cuales sirven para generar las familias de curvas polimórficas y calificar el índice de sitio para plantaciones específicas, en este caso, se considera que el valor asintótico es constante para todos los sitios y lo que varía es la velocidad de crecimiento. Los pasos para su construcción se presentan a continuación:

- Las ecuaciones de crecimiento en su forma integral se ajustan a la base de datos para generar la curva guía.

- a) Las ecuaciones de crecimiento en su forma integral se ajustan a la base de datos para generar la curva guía.
- b) Cuando la edad (E) coincide con la edad base (E_0), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS).
- c) De la ecuación de IS se despeja β_2 para las ecuaciones de Schumacher y Weibull y β_3 para Chapman – Richards y se sustituyen en las ecuaciones integrales, con lo que se obtienen las ecuaciones que generan las familias de curvas polimórficas mediante el método de la curva guía.
- d) Despejando el índice de sitio de la ecuación mencionada, se obtiene la expresión con la cual se califica el índice de sitio para un rodal creciendo en un lugar específico.

(Sus expresiones en el Cuadro 1).

Para ejemplificar lo anterior, se trabajó con información de plantaciones de caoba establecidas en el área de influencia del Campo Experimental "San Felipe Bacalar", Quintana Roo, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con el objetivo de elaborar ecuaciones de índice de sitio mediante el método de la curva guía con modelos de Schumacher, Chapman – Richards y Weibull en sus versiones anamórficas y polimórficas para plantaciones de caoba (*Swietenia macrophylla* King). La hipótesis planteada fue que mediante el método de la curva guía y los modelos de Schumacher, Chapman – Richards y Weibull, es posible construir curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio para plantaciones forestales de caoba (*Swietenia macrophylla* King).

Cuadro 1. Ecuaciones de crecimiento en altura dominante, índice de sitio, familias de curvas y calificación de índice de sitio

MODELO	ECUACIÓN INTEGRAL	IS	FAMILIA DE CURVAS	CALIFICACIÓN DE IS
Schumacher (anamórfica)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = IS e^{-\beta_2 E_0^{-1} - E^{-1}}$	$IS = H e^{\beta_2 E_0^{-1} - E^{-1}}$
Chapman Richards (anamórfica)	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-(\beta_2 E_0)}]^{\beta_3}$	$H = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0}}{1 - e^{-\beta_2 E}} \right]^{\beta_3}$	$IS = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0}}{1 - e^{-\beta_2 E}} \right]^{\beta_3}$
Weibull (anamórfica)	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$	$H = IS \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}}{1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}} \right]$	$IS = H \left[\frac{1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}}{1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}} \right]$
Schumacher (polimórfica)	$H = \beta_1 e^{-\beta_2 E^{-1}}$	$IS = \beta_1 e^{-\beta_2 E_0^{-1}}$	$H = \beta_1 \left(\frac{IS}{\beta_1} \right)^{\frac{E_0}{E}}$	$IS = \beta_1 \left(\frac{H}{\beta_1} \right)^{\frac{E}{E_0}}$
Chapman Richards (polimórfica)	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-(\beta_2 E_0)}]^{\beta_3}$	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\frac{\ln(IS/\beta_1)}{\ln(1 - e^{-(\beta_2 E_0)})}}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\frac{\ln(H/\beta_1)}{\ln(1 - e^{-(\beta_2 E)})}}$
Weibull (polimórfica)	$H = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E}]^{\beta_3}$	$IS = \beta_1 [1 - e^{-\beta_2 E_0}]^{\beta_3}$	$H = \beta_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{E}{E_0} \right)^{\beta_3} \ln \left(1 - \frac{IS}{\beta_1} \right)} \right]$	$IS = \beta_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{E_0}{E} \right)^{\beta_3} \ln \left(1 - \frac{H}{\beta_1} \right)} \right]$

Donde:

H = Altura dominante.
 IS = Índice de sitio.

E_0 = Edad base (años).
 E = Edad (años).

β 's = Parámetros a ser estimados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Campo Experimental "San Felipe Bacalar" está ubicado en el Sureste de México, donde la caoba se distribuye en poblaciones naturales, aunque dispersas y con

densidades extremas. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas geográficas 18°46' a 18°51' norte y 88°17' a 88°32' oeste, a una altitud promedio de diez metros, en el municipio de Othón Pompeyo Blanco, Quintana Roo (Chavelas, 1981) (Fig. 1). Clima. De acuerdo con la clasificación de

Koëpen, modificada por García (1983), el clima existente es un Aw(x')i o cálido subhúmedo con lluvias en verano y parte del invierno, la oscilación térmica es menor a 5°C. La temperatura media anual es de 25.5°C y la precipitación anual es de 1260 mm, con una época seca bien marcada entre diciembre y mayo (INEGI, 1986; García, 1995).

Suelos

La superficie del terreno es casi plana, localizándose la mayor parte de los tipos de suelo de la Península de Yucatán, y que según la terminología maya y su equivalente FAO – UNESCO (1970), citados por Ortiz (1997) son: Tzek'el (Litosol), Kakab (Rendzina); K'ankab (Luvisol crómico), Yax-hoom (Vertisol pélico), Ak'alche (Vertisol gleyco) y Sabana (Gleysol). Los cuatro primeros tienen un buen drenaje, los Ak'alche presentan inundaciones temporales sobre todo en épocas de lluvia y los suelos de sabana registran inundaciones permanentes (Chavelas, 1981).

Hidrología

El Campo Experimental tiene acceso en una franja de cien metros a la laguna de Bacalar, límite este de su superficie, a su vez 2,025 ha de la laguna de San Felipe se encuentran rodeadas por los terrenos del Campo y 230 ha de la laguna de la Virtud se ubican dentro de su territorio (García, 1995).

Vegetación

Según Chavelas (1981) existen los siguientes tipos de vegetación:

- a) **Selva mediana subperennifolia.** Desarrollándose sobre suelos someros (Tzek'el y K'ankab), en el estrato superior sobresalen individuos que alcanzan entre 20 y 30 m de altura, las especies más comunes son zapote (*Manilkara zapota* (L.) Van Royen), ya'axnic (*Vitex gaumeri* Grenm), jobo (*Spondias mombin* L.), boop (*Coccoloba cozumelensis* Hemsl.), kanisté (*Pouteria campechiana* H.B.K.), ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.), amapola (*Pseudobombax ellipticum* H.B.K.) y chacá (*Bursera simaruba* L.).
- b) **Selva mediana subperennifolia.** Sobre suelos profundos (yax-hoom). El estrato superior alcanza entre 20 y 30 m,

dominado por especies como la caoba (*Swietenia macrophylla* King), granadillo (*Platymiscium yucatanum* Standl.), zapote (*Manilkara zapota* (L.) Van Royen), machiche (*Lonchocarpus castilloi* Standl.), jobo (*Spondias mombin* L.), maculís (*Tabebuia rosea* (Bertol) D.C.), pucté (*Bucida buceras* L.) y k'atalox (*Swartzia cubensis* (Britt et Wilson) Standl.).

- c) **Selva baja caducifolia.** Sobre suelos temporalmente inundables, conocidos como bajos o akalchés, la vegetación soporta un período de inundación; las especies dominantes alcanzan diez metros o poco más, cuyos fustes son generalmente torcidos. Las especies más comunes son: perescutz (*Croton reflexifolius* H.B.H), sac-páh (*Byrsonima bucidaefolia* (L.) H.B.K.), sac-chacá (*Dendropanax arboreus* (L.) Planch et Decne), caoba (*Swietenia macrophylla* King), zapote (*Manilkara zapota* (L.) Van Royen), tinto (*Haematoxylon campechianum* L.), yaití (*Gymnanthes lucida* Sw.), boop (*Coccoloba cozumelensis* Hemsl.), madre cacao o cocohite (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunt. ex Walp.) y zapote faisán (*Dipholis salicifolia* (L.) A.D.C.).
- d) **Sabanas.** Son áreas que permanecen inundadas casi en forma permanente y donde dominan las ciperáceas, gramíneas (como la cortadera) y algunos árboles esparcidos de nance (*Byrsonima crassifolia* (L.) A.D.C.) y güiro (*Crescentia* sp.).

Toma de datos

Se realizaron mediciones de parcelas completas en plantaciones de caoba de diferentes edades, clasificándolas por tipo de suelo y por factor ecológico determinante del comportamiento de la especie local. Algunas plantaciones contaron con remediciones, mientras que para otras fue la primera medición, aunque se conocía la edad. En la mayor parte de las plantaciones, desde su establecimiento se desvara periódicamente la vegetación espontánea, por lo que cada plantación incluida en la muestra registró las siguientes variables:

- a) Edad: Desde el establecimiento en campo hasta la fecha de la toma de datos.

- b) Altura total: Desde la base hasta la punta, donde se identifica el fuste principal; altura del fuste limpio hasta las primeras ramas.
- c) Diámetro: Diámetro normal de cada árbol medido a 1.3 m.
- d) Tipo de suelo: Clasificado según la terminología maya.
- e) Labores de manejo: Si se han practicado labores como limpieza de malezas periódicamente, podas o aclareos.

Evaluación estadística

Se realizó un análisis estadístico para un muestreo simple estimando los parámetros de las plantaciones medidas, estandarizando a unidad de superficie (ha) el número de árboles, área basal (m²) y volumen total (m³),

usando el paquete Statistical Analysis System (SAS) y el procedimiento *Means* (SAS Institute Inc, 1991; 1992). Para determinar las funciones de índice de sitio, mediante el método de mínimos cuadrados, se ajustaron los modelos no lineales de Schumacher, Chapman - Richards, Weibull.

El análisis empleó el procedimiento *NLIN* del paquete SAS y el método *Marquardt* (con derivadas) (SAS Institute Inc, 1991; 1992), obteniendo las expresiones enunciadas en 2.5 y 2.6. La selección de las ecuaciones se hizo con base en la bondad de ajuste del cuadrado medio del error (CME), el valor de *F_c*, los estadísticos *pseudo R²*, intervalos de confianza de los estimadores, coeficiente de variación y distribución de residuales.

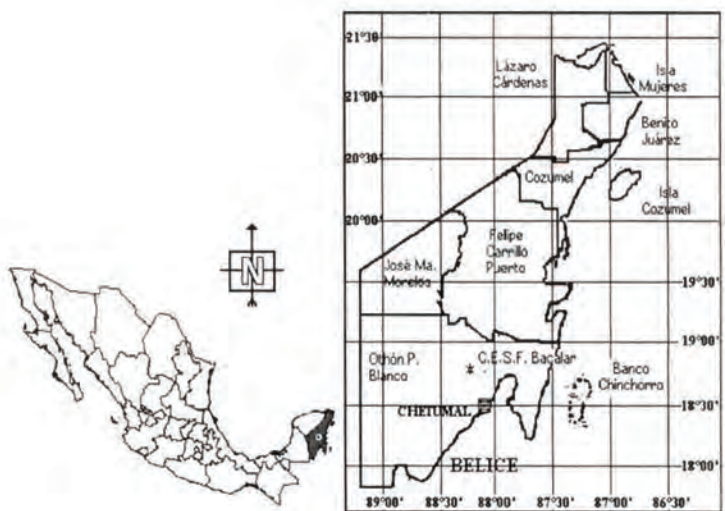


Figura 1. Localización geográfica del Campo Experimental "San Felipe Bacalar"

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características dasométricas

El Cuadro 2 presenta información dasométrica de quince plantaciones de *S. macrophylla* en el área de influencia del Campo Experimental "San Felipe Bacalar". Las plantaciones que cubren un rango de edades de siete a 34 años, creciendo en suelos, *K'ankab*, *Yax-hoom* y *Puslum*. Las variables de número de árboles, área basal y volumen total fueron estandarizados a una hectárea con fines de comparación.

Funciones de índice de sitio

Clutter *et al.* (1983), explica que para muchas

especies las áreas de buena calidad de sitio son también áreas donde ocurren altas tasas de crecimiento en altura. Para estas especies el potencial de producción en volumen y el crecimiento en altura están positivamente correlacionados. La utilidad de la correlación volumen potencial - crecimiento en altura del fuste es realmente que el patrón de altura de los árboles dominantes en rodales coetáneos resulta poco afectada por la densidad y las cortas intermedias (excepto los aclareos por lo alto). Para especies las cuales el crecimiento en altura es significativamente influenciada por la variación en la densidad inicial, la estimación de la calidad de sitio a

Cuadro 2. Características dasométricas de plantaciones de *Swietenia macrophylla* King en Quintana Roo

Edad (años)	SUE	NAH	ABH (m ² /ha)	VTH (m ³ /ha)	DN (cm)				DQ (cm)				HT (m)				HFL (m)			
					Pro	Min	Max	Std	Pro	Std	Pro	Min	Max	Std	Pro	Min	Max	Std		
7	PUS	1648	4.7879	47.1405	5.8	2.1	11.6	1.7	6.0	4.5	5.5	2.0	8.2	1.1	2.2	1.1	4.0	0.6		
7	KAN	1122	6.3347	56.6429	8.3	3.1	13.8	1.8	8.5	5.6	5.2	2.1	8.4	1.3	2.6	0.2	5.2	1.1		
12	YAX	929	19.3143	266.5442	15.6	4.4	26.0	4.5	16.3	11.8	11.1	5.5	26.4	2.3	7.5	2.8	13.1	1.9		
13	PUS	1221	18.1134	219.9103	13.0	4.2	27.8	4.3	13.7	11.3	8.8	4.3	12.3	1.8	6.1	1.6	10.9	1.8		
13	KAN	366	8.0849	87.6140	16.5	8.2	24.0	3.2	16.7	10.2	8.3	3.3	15.9	2.0	2.6	1.7	4.3	0.6		
19	YAX	747	13.7121	164.6946	14.1	3.6	33.5	5.9	15.3	13.6	8.5	3.0	14.6	2.4	5.4	1.1	11.7	2.0		
24	YAX	968	40.9074	573.4849	21.8	7.2	45.0	7.9	23.2	19.9	12.2	4.7	19.3	2.9	7.4	2.5	15.6	2.7		
24	PUS	1142	29.6111	396.0972	17.1	8.1	36.2	6.2	18.2	15.9	10.6	5.0	17.3	3.0	6.6	0.8	15.1	3.3		
24	PUS	1065	28.0736	384.0332	17.1	4.9	33.4	6.2	18.2	14.8	11.2	4.1	17.0	2.8	5.4	1.7	13.5	2.2		
24	PUS	1225	28.6294	387.0846	15.5	3.4	45.0	7.7	17.2	17.1	10.1	3.2	16.2	3.3	6.2	1.1	12.4	2.6		
26	PUS	582	35.2579	470.7309	25.2	7.5	86.0	11.6	27.8	29.2	11.8	5.0	16.8	2.8	7.7	2.3	13.9	2.7		
26	PUS	1425	26.6440	370.4313	14.2	2.8	36.2	6.0	15.4	13.9	10.6	2.3	17.3	2.9	5.4	1.2	11.8	2.1		
34	PUS	777	32.3760	477.6763	21.0	4.4	49.7	9.5	23.0	21.3	12.7	4.8	21.3	3.4	7.2	1.6	12.7	2.6		
34	PUS	323	28.9529	429.4121	32.9	16.5	47.8	7.5	33.8	22.4	15.5	11.6	19.2	1.5	6.5	3.0	12.8	1.9		
34	KAN	333	24.3756	369.4720	29.3	9.7	46.8	8.5	30.5	22.4	15.5	11.5	19.1	1.8	6.2	2.4	10.2	1.7		

Donde: SUE = Tipo de suelo (Clasificación maya).

PUS = Puslum.

KAN = K'anab.

YAX = Yax-hoom.

ABH = Área basal (m²/ha).

VTH = Volumen total (m³/ha).

NAH = Número de árboles por ha.

DN = Diámetro normal (cm).

DQ = Diámetro cuadrático (cm).

HT = Altura total (m).

HFL = Altura de fuste limpio (m).

partir de datos provenientes de esos rodales puede proveer resultados muy pobres a menos que se incluyan relaciones que reflejen el efecto de la densidad a distintas edades (Clutter *et al.*, 1983).

Usuarios de las curvas de índice de sitio erróneamente suponen que el objetivo de los procedimientos de índice de sitio es la predicción de la altura del rodal a una edad indicada. El verdadero objetivo es la selección del patrón de desarrollo en altura que el rodal puede esperar seguir durante el resto de su vida (Clutter *et al.*, 1983). Para este propósito se eligieron entre 20 y 25 árboles dominantes y codominantes de cada plantación (424 individuos), y en este caso que trata captar toda la variabilidad y potencial genético de los individuos y de la respuesta del crecimiento en altura en los microambientes en que se desarrollan, ningún árbol elegido se discrimina por presentar tendencias atípicas del resto de los seleccionados y que influye en la obtención de mejor o peor ajuste de las ecuaciones. Para Clutter *et al.* (1983), no es raro que en estudios de índice de sitio se obtengan bajos ajustes en las regresiones, lo que puede deberse a la respuesta del crecimiento de los árboles en diferentes condiciones (suelo, clima, etc.) o a los errores de muestreo, sobre todo cuando se trabaja con variables del suelo.

Curvas anamórficas

Se observan los resúmenes de resultados de

los análisis de varianza para los modelos probados y las tendencias de los valores predichos en el Cuadro 3 y la Figura 2. La literatura indica que Schumacher subestima el crecimiento a edades tempranas (Figura 2a) y lo sobreestima al final de las curvas, tal como se observa en la asíntota (Cuadro 3), lo que se debe a la geometría del modelo (Madrigal, 1995; Madrigal y Ramírez, 1995; Rodríguez, 1996). Por su parte, con los modelos de Chapman - Richards y Weibull ajusta mejor las ecuaciones estimadas, pero las ecuaciones sobreestiman el crecimiento para edades tempranas y lo subestiman al final de las curvas (Figuras 2b y 2c). Se observa en este caso que con los modelos de Chapman - Richards y Weibull se logran buenos ajustes para este tipo de curvas, lo cual concuerda con lo obtenido por Rodríguez (1996), y aunque el modelo de Chapman - Richards minimiza la suma de cuadrados del error y por consecuencia el Cuadrado Medio del Error (CME=1.20979) y la desviación estándar del error asíntótico, difiere muy poco del modelo Weibull.

El que los modelos de Chapman - Richards y Weibull sobreestimen el crecimiento al inicio de las curvas y lo subestimen al final, para el caso es lógico si pensamos en la especie, sus hábitos de crecimiento y las edades de las plantaciones, dado que los árboles aun están fase acelerada de crecimiento. El parámetro β_1 representa el valor asíntótico o máxima altura que los

Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza de tres modelos para construir curvas anamórficas de índice de sitio mediante el método de la curva guía para *Swietenia macrophylla* King, en Quintana Roo.

MODELO	GL	CME	FC	R ²	PARÁMETROS	STD DEL ERROR		LÍMITES (95%)	
						ASINTÓTICO	INFERIOR	SUPERIOR	
Schumacher	423	1.365323	24286.24325	0.99	$\beta_1=20.2201385$	0.1796807919	19.86695240	20.57332461	
					$\beta_2=-7.2068830$	0.1599486372	-7.521283062	-6.89248310	
Chapman Richards	422	1.20979	18290.66487	0.99	$\beta_1=18.1310409$	0.21654747298	17.705385599	18.556696198	
					$\beta_2=0.0751838$	0.0234436484	0.029101944	0.121265691	
					$\beta_3=1.0566482$	0.18321222538	0.696518148	1.416778270	
Weibull	422	1.212312	18252.42894	0.99	$\beta_1=18.23445287$	0.40214500454	17.443978843	19.024926892	
					$\beta_2=0.06742382$	0.00397369826	0.059612944	0.075234698	
					$\beta_3=1.01980030$	0.03489600800	0.951207165	1.088393442	

árboles pueden alcanzar (teóricamente a una edad infinita) en este caso a la edad de 34 años, ya que fue el universo de datos altura dominante - edad con que se trabajó para el ajuste de las ecuaciones indicadas en el Cuadro 1.

Se observan en la Figura 2a, 2b y 2c las tendencias de los valores predichos para las familias de curvas generadas, al detectar que la ecuación de Schumacher, subestima el crecimiento a edades tempranas y lo sobrestima al final de las curvas, tal como se observa en las asíntotas, ya que predice valores superiores a los observados. Los puntos de inflexión de máximos incrementos en los tres casos, se presentan a la misma edad, lo que coincide con lo reportado por Madrigal (1995) y Madrigal y Ramírez (1995). Los modelos de Chapman-Richards y Weibull, presentan ligeramente un mejor ajuste, según la bondad del CME y tienen una mayor fidelidad para representar los datos observados. En todos los casos, la curva guía corresponde al índice de sitio de 16 m.

La calificación del índice de sitio para cada una de las plantaciones y tipos de suelo, de acuerdo a la ecuación de Chapman-Richards, son respectivamente: 16.03 (*Puslum*), 16.07 (*K'ankab*), 19.66 (*Yax-hoom*), 18.20 (*Puslum*), 17.60 (*K'ankab*), 18.93 (*Yax-hoom*), 20.85 (*Yax-hoom*), 20.41 (*Puslum*), 18.89 (*Puslum*), 19.82 (*Puslum*), 20.22 (*Puslum*), 20.20 (*Puslum*), 21.34 (*Puslum*), 21.30 (*Puslum*) y 21.25 (*K'ankab*). En promedio, los índices de sitio para el suelo *Puslum* es de 19.71 m (STD = 1.66), para suelo *K'ankab* de 18.21m (STD = 2.66) y para *Yax-hoom* de 19.81 m (STD = 0.97), respectivamente a la edad base de 30 años, lo cual indica que los árboles tienen más potencial de crecimiento cuando se desarrollan en suelos tipo *Yax-hoom*.

Curvas polimórficas

Como β_2 es el parámetro dependiente del sitio que representa la velocidad de crecimiento y el *IS* es igual a la altura a la edad base, para graficar la familia de curvas polimórficas, de las ecuaciones anteriores, se despejó β_2 y se obtuvieron las ecuaciones que se indican en el Cuadro 1 mismos que sirvieron para generar las familias de curvas polimórficas y calificar el índice de sitio para plantaciones específicas.

Evidentemente, se presentó polimorfismo en las curvas y los puntos de inflexión para cada índice de sitio ocurren a diferentes edades, alcanzando los puntos de máximo incremento en los sitios de mayor calidad de estación (Figura 2d, 2e y 2f), lo cual concuerda con Rodríguez (1996) y Madrigal (1995).

Al comparar el comportamiento de las curvas con los datos observados, se detecta que la ecuación de Schumacher y Chapman - Richards (Figura 2d y 2e) sobreestiman en gran medida la altura dominante de los árboles en índices de sitio de mayor calidad de estación y sobre todo a edades tempranas y la subestima en calidades de sitio pobres. Por su parte, la ecuación Weibull (2f) representa más fielmente a los datos observados, por lo que en este caso se considera que es la mejor ecuación (Fig. 2).

Aceptando como cierto el polimorfismo del crecimiento de los árboles desarrollándose en diferentes suelos y calidades de sitio es indudable que, teóricamente, el potencial del patrón de desarrollo en altura que las plantaciones pueden seguir durante el resto de su vida, sea representado más confiablemente a través del modelo Weibull (Figura 2f).

Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México

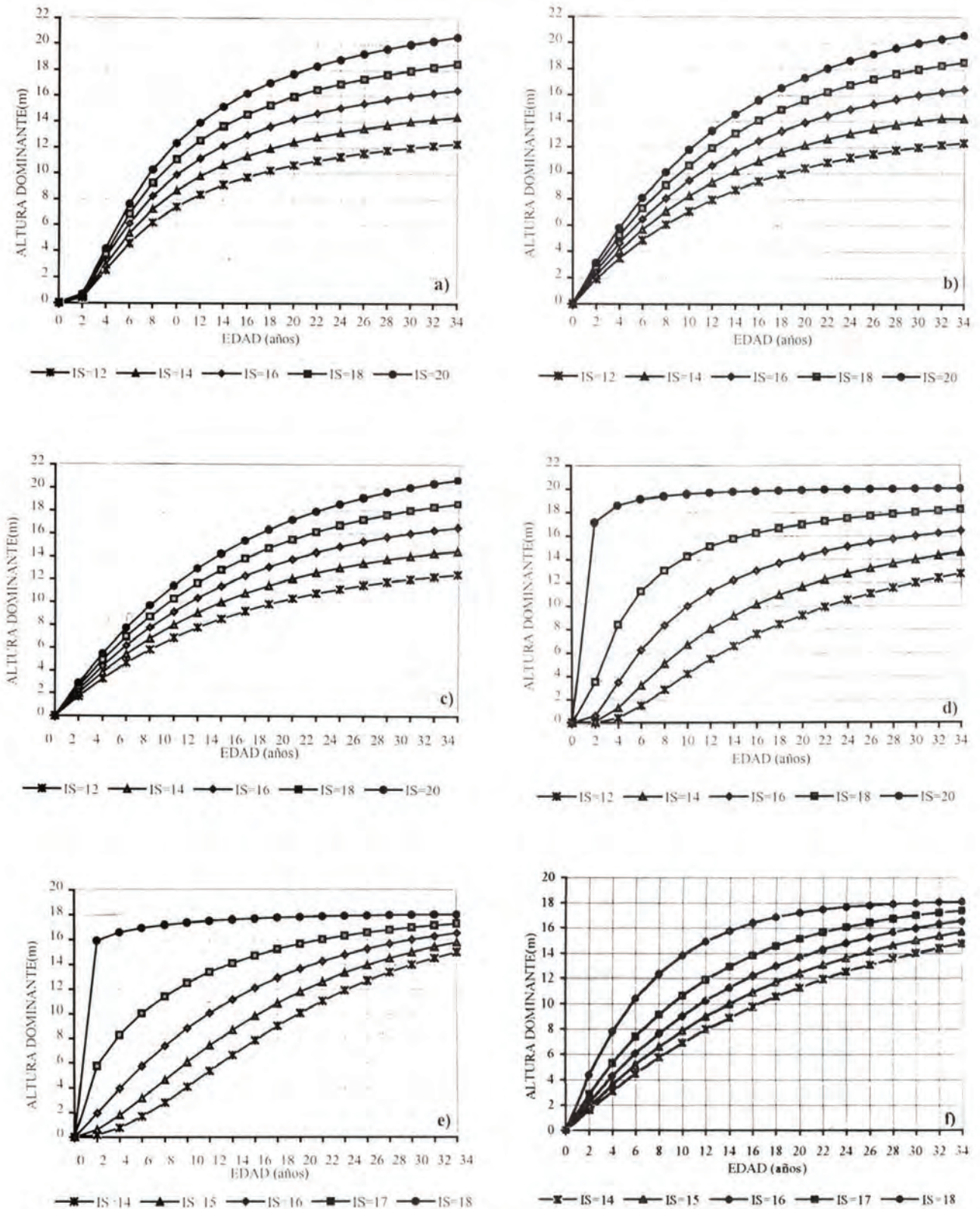


Figura 2. Curvas de índice de sitio para *Swietenia macrophylla* King, a la edad base de 30 años en Quintana Roo, México, empleando el método de la curva guía y modelos de Schumacher, Chapman - Richards y Weibull (a, b y c: anamórficas; d, e y f: polimórficas).

CONCLUSIONES

Con base en los estadísticos presentados, para la estimación de la calidad de sitio, las expresiones de Chapman – Richards y Weibull en su versión anamórfica presentan los mejores ajustes y representan mejor la tendencia de los datos observados, pero de los dos el de Chapman – Richards se considera el mejor.

La ecuación Weibull, para las curvas polimórficas, resulta ser la que con mayor fidelidad representa a los datos observados, por lo que en este caso se considera que es una buena ecuación.

Las técnicas utilizadas proveen resultados aceptables para la estimación del índice de sitio para plantaciones de caoba en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Acosta M., M. 1991. Modelo de crecimiento para *Pinus montezumae* Lamb. En el CEF San Juan Tella, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. México. 80 p.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia a los trópicos. Vol. 2. Predicción del rendimiento. FAO. Montes. Roma, Italia. 118 p.
- Ayerde L., D. 1996. Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Bailey, R.L. and T.R. Dell. 1973. Quantifying diameters distribution with the Weibull function. *For. Sci.* 19:97-104.
- Chapman, D.G. 1961. Statistical problems in populations dynamics. *Proc Fourth Berkely Symp Math Stat and Prob.* Univ Calif Pres, USA. p. 153-168.
- Chavelas P., J. 1981. Campo Experimental Forestal San Felipe Bacalar. *Ciencia Forestal* 1(3):65-82. México. p 65-82.
- Clutter, J.L.; J.C., Fortson; L.V., Pienaar, G.H., Brister and R.L., Bailey. 1983. *Timber management a quantitative approach.* Wiley and Sons, New York. 333 p.
- Curtis, R.O. 1964. A stem - analysis approach to site - index curves. *For. Sci.* 16: 403-414.
- Devan J., S. and H.E. Burkhart. 1982. Polimorphic site index equations for loblolly pine based on a segmented polynomial differential model. *Forest Science* 28(3):345-353.
- Fisher, R.A. and L.E.C. Tippett. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 24, 180-190.
- García C., X. 1995. Campo Experimental "San Felipe Bacalar". SAGAR-INIFAP. Centro de Investigación Regional del Sureste. Quintana Roo, México.
- García, E. 1983. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, D. F. México. 252 p.
- INEGI, 1986. Anuario estadístico del estado de Quintana Roo. Gobierno del estado de Quintana Roo.
- Madrigal H., S. 1995. Determinación de la productividad de dos especies de pino considerando características físicas y químicas del suelo en Michoacán. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Madrigal H., S. y H. Ramírez M. 1995. Comparación de nueve modelos empíricos para la determinación de índice de sitio en Michoacán. *Revista Ciencia Forestal en México.* 20(79):35-57.
- Magaña T. O.S., J.M.Torres R., y M. Acosta M. 1992. Guía de uso de WEST: Programa para estimar parámetros de la función de distribución de probabilidades Weibull. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. (En prensa).
- Ortiz S., C.A. 1997. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Edafología. Montecillo, México.
- Pienaar, L.V. & R.J. TURNBULL. 1973. The Chapman - Richards generalization of Von Bertalanfy growth models for basal area growth and yield in even - age stands. *For. Sci.* 19(1):2-21.
- Pritchett, H.W. and R.F. Fisher. 1987. *Properties and management of forest soils.* 2nd ed. USA. 494 p.
- Prodan, M. 1968. *Forest biometrics.* Trad. By S.H. Gardiner. Oxford Pergamon Press. 447 p.
- Ramírez A., H. 1981. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Ciencia Forestal en México.* 16(70):87-108.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10(29):290-300.
- Rodríguez S., B. 1996. Estimación del crecimiento y relaciones dasométricas de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en plantaciones forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 104 p.
- SAS INSTITUTE INC. 1992. *SAS/STAT User's Guide.* Release 6.03 Edition. Cary, NC. USA. 1028 p.
- Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. 1994. *Inventario Nacional Forestal Periódico.* Memoria Nacional. México.
- Schumacher, F.X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *Journal of Forestry* 37:819-820.
- Spurr, S.H. 1952. *Forest inventory.* New York. Wiley. pp 275-292.
- Stage, A.R. 1963. A mathematical approach to polimorphic site index curves for grand fir. *Forest Science.* 9(2):67-80
- Zamudio S. F. J. y D. Ayerde L. 1997. Modelos de crecimiento. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales.* 3(1):79-87.
- Zepeda B., E.M. y P. Rivero B. 1984. Construcción de curvas anamórficas de Índice de sitio: Ejemplificación del método de la curva guía. *Ciencia Forestal.* 9(51):3-38.