

ÍNDICE DE SITIO PARA *Cedrela odorata* L. (CEDRO ROJO) EN QUINTANA ROO, MÉXICO

Xavier García Cuevas¹, J. Germán Flores Garnica² y
Juan de Dios Benavides Solorio²

RESUMEN

Evaluar la productividad de un sitio forestal permite predecir la cantidad de madera que el suelo puede producir en cierto periodo. Los métodos indirectos son la forma más común de hacerlo por su sencillez, porque utilizan variables fáciles de medir en campo y funcionan como predictores de crecimiento. Esta investigación se realizó en Quintana Roo, México y para ello se tomó información de remediciones de plantaciones puras de *Cedrela odorata* (cedro rojo), con el objetivo de ajustar el modelo de Schumacher con el Método de la Curva Guía para desarrollar ecuaciones anamórficas y polimórficas de índice de sitio. En el análisis se aplicaron técnicas de regresión no lineal mediante el Método de Mínimos Cuadrados con el procedimiento NLIN (Regresión no lineal) y la opción DUD (sin uso de derivadas) del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System). Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo fueron: Cuadrado Medio del Error (CME = 6.33412) y Pseudo R² (R² = 0.84). De acuerdo a lo anterior el modelo obtenido es válido para predecir la altura dominante en función de la edad y es factible trabajar bajo la hipótesis de que para el caso de plantaciones con *Cedrela odorata* es posible medir la productividad de los suelos forestales mediante el índice de sitio como indicador.

Palabras claves: *Cedrela odorata*, curvas anamórficas, curvas polimórficas, índice de sitio, método de la curva guía, modelo de Schumacher.

Fecha de recepción: 20 de enero de 2004

Fecha de aceptación: 25 de junio de 2007

¹ Campo Experimental Chetumal. Centro de Investigación Regional del Sureste. INIFAP. garcia.xavier@inifap.gob.mx

² Campo Experimental Altos de Jalisco. Centro de Investigación Regional Pacifico Centro. INIFAP.

ABSTRACT

To assess the productivity of the forest site makes it possible to predict the amount of wood that the soil may produce at a particular time. Indirect methods are the most common way to do it, as they are simple, the use variables that are easy to measure in the field and they work as growth predictors. This research was carried out in Quintana Roo, México. Remeasurements data of pure (red cedar) *Cedrela odorata* plantations were used. The aim of this study was to apply the Schumacher model and the Guide Curve Method to develop anamorphic and polymorphic site index equations. For the data analysis and generation of the equation, non-linear regression techniques were used through the Minimum Square Method, using the Statistical Analysis System (SAS) program with its non-linear regression procedure (NLIN), and the DUD option (Doesn't use derivatives). The adjustment statistics considered here were: Mean Square Error (MSE = 6.33412) and Pseudo R^2 ($R^2 = 0.84$). Thus, the model is valid to predict the dominant height as an age function and under the hypothesis that it is possible to measure productivity of the forest soils by using the site quality index as an indicator.

Key words: *Cedrela odorata*, anamorphic curves, polymorphic curves, site quality index, guide curve method, Schumacher model.

INTRODUCCIÓN

El hábitat de un bosque está compuesto por la suma total de los factores geológicos, edáficos, climáticos, bióticos y genéticos, que influyen en la capacidad del medio para sustentar a los seres vivos, incluyendo a los árboles y otros tipos de plantas presentes en el sitio (Pritchett, 1986; Spurr y Barnes, 1982), definido éste como un área con características específicas que alberga un tipo y calidad de vegetación. Su evaluación integral se efectúa por medio del índice de sitio, que representa la altura dominante alcanzada por un rodal coetáneo a una edad de referencia (Zepeda y Rivero, 1984). En Dasonomía se usa para determinar la capacidad de un lugar para soportar el crecimiento de las especies forestales (Spurr y Barnes, 1982).

La clasificación del sitio se basa en variables climáticas, edáficas y de vegetación, o en clases, las cuales perfilan cierta probabilidad de crecimiento y productividad (Avery y Bukhart, 1983). Para calificarlo se requiere comprender el significado de conceptos como "capacidad productiva", "productividad del sitio" y "calidad de estación" (Zepeda y Rivero, 1984), lo que ayudará, por ejemplo, a tipificar la capacidad potencial de producción de madera de un rodal para una especie o un tipo de bosque en particular. En otras palabras, se obtiene un índice que establece, de forma muy aproximada, la máxima cantidad de

volumen de madera que el suelo es capaz de producir en un cierto periodo (Clutter *et al.*, 1983; Davis y Jonson, 1987).

Conocer la productividad de un sitio forestal, por lo general, implica hacer mediciones de sus características (geológicas, edáficas, climáticas, bióticas y genéticas) y del rodal (altura, edad, etc.), con las que se formulan indicadores (Madrigal, 1995); uno de ellos es la calidad de sitio (Benavides y Manzanilla, 1993), cuyas técnicas de evaluación y estimación han evolucionado, hasta tener en la actualidad varios sistemas de clasificación, todos interesantes de acuerdo a sus objetivos (Pritchett y Fisher, 1987).

Los métodos que se aplican para lograr lo anterior pueden ser directos e indirectos. Los primeros son muy precisos y manejan registros permanentes de producción, con datos de volumen por unidad de superficie o altura del arbolado. Los segundos consideran la relación que existe entre las características del sitio y de la vegetación (Clutter *et al.*, 1983).

Los indirectos constituyen la modalidad más común para estimar la calidad de sitio, debido a que para su construcción se utilizan variables fáciles de medir en campo, son sencillos y se obtienen a bajo costo, conducen a resultados de manera muy precisa y funcionan como predictores de crecimiento (Carmean y Lenthall, 1989). La relación altura - edad (Índice de sitio) es la medida más práctica, consistente y útil como indicador de la calidad de sitio (Davis y Johnson, 1987).

Calidad de sitio

Con base en este concepto, la productividad es relativa de acuerdo a la especie, de manera que un área representa un alto potencial productivo para un taxón y bajo para otro (Clutter *et al.*, 1983).

Índice de sitio

Es uno de los métodos más usados para calificar la calidad de sitio en masas coetáneas, preferentemente puras, con base en las relaciones de altura dominante - edad. Se considera que la altura promedio es afectada por la edad y la densidad del rodal, así como por la calidad de sitio. Por ello es común usar la altura dominante a una determinada edad, ya que es el mejor indicador del potencial productivo del bosque en un lugar en particular, puesto que es una variable que no está influenciada por la densidad (Alder, 1980). Sin embargo, dicho parámetro deja de ser un buen indicador de la calidad de sitio para rodales jóvenes de especies de muy rápido crecimiento, como las que se desarrollan en los trópicos, o en ciertos taxa que presentan gran variabilidad en sus patrones de desarrollo.

Tipos de familias de curvas de índice de sitio

Una familia de curvas consiste en la construcción de un sistema de ecuaciones de crecimiento en altura, que revelan el comportamiento para diferentes calidades de estación y durante toda la vida del rodal (Stage, 1963). En la determinación de índice de sitio, se reconocen dos variantes: a) anamórficas y b) polimórficas

Curvas anamórficas.- Se caracterizan por mostrar la misma forma, ya que son proporcionales entre sí, y la pendiente de la altura a cualquier edad guarda una relación constante entre ellas (Clutter *et al.*, 1983). También tienen un punto de inflexión a la misma edad; es decir, las curvas de índice de sitio son anamórficas, sí hay una tasa relativa de crecimiento constante para todos los índices de sitio a una edad específica y el punto de inflexión es a la misma edad para todas ellas (Zepeda y Rivero, 1984). Cuando se grafican en escala logarítmica son rectas paralelas, con igual pendiente, pero con diferente ordenada al origen.

Curvas polimórficas.- Su pendiente es variable, generalmente no guardan una relación de paralelismo y son independientes unas de otras; por lo tanto sus puntos de inflexión ocurren a edades diferentes. En ellas se observa que la culminación del crecimiento en altura se alcanza más pronto en sitios de buena calidad (Clutter *et al.*, 1983); Zepeda y Rivero, 1984; Acosta, 1991). Por lo anterior, la tasa relativa de crecimiento es variable para todos los índices de sitio; lo que significa que es distinta para cada edad. Las curvas polimórficas, al no ser proporcionales unas a otras, indican que existen distintos hábitos de crecimiento para las diversas clases de índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

Las curvas polimórficas son articuladas (no cruzadas) o desarticuladas (cruzadas). Las primeras se relacionan, aunque de manera no proporcional sin intersectarse en los intervalos de interés; mientras que las segundas son independientes, pero es posible que se crucen en los puntos antes referidos (Clutter *et al.*, 1983).

Existen numerosos estudios sobre este tema en ecosistemas forestales templados, y pocos con especies de las regiones tropicales. Por lo tanto se planteó el estudio que se describe a continuación con el objetivo de elaborar ecuaciones de índice de sitio mediante el método de la curva guía con el modelo de Schumacher en sus versiones anamórfica y polimórfica para plantaciones forestales de *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) en Quintana Roo, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de interés se localiza en el sureste de México, dentro del área de influencia del Sitio Experimental "San Felipe Bacalar" ubicado entre las coordenadas

geográficas $18^{\circ}44'49.2''$ a $18^{\circ}52'10.5''$ de latitud Norte y $88^{\circ}19'28.5''$ a $88^{\circ}30'52.6''$ de longitud Oeste, Municipio de Othón Pompeyo Blanco, Quintana Roo, México, a una altitud promedio de 10 m (Figura 1).

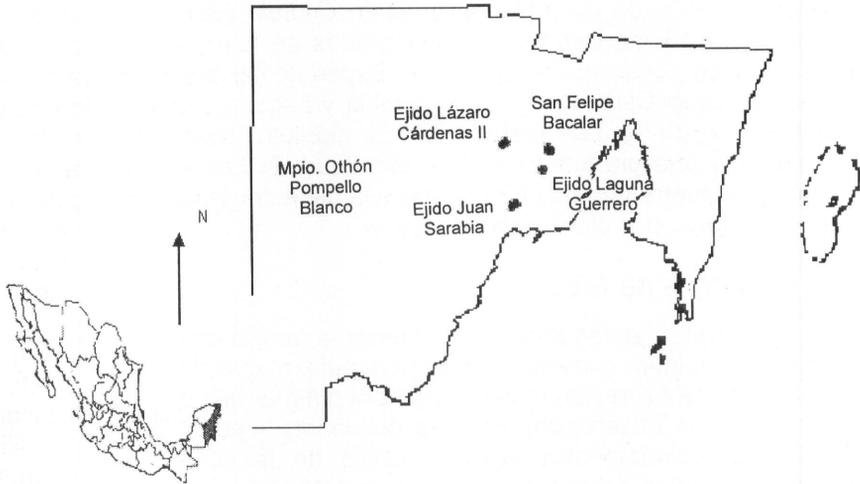


Figura 1. Localización geográfica del Sitio Experimental "San Felipe Bacalar" en Quintana Roo, México.

Con base en la clasificación de Koëppen modificada por García (1983), la fórmula climática del lugar es $Aw(x')_i$, que corresponde a un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y parte del invierno; la oscilación térmica promedio mensual es menor a 5°C . La temperatura media anual es de 25.5°C y la precipitación anual de 1260 mm, con una época seca bien definida entre diciembre y mayo (INEGI, 1986; García, 1998; García *et al.*, 1998).

La topografía del terreno es casi plana y en ella se presentan la mayor parte de los suelos citados para la Península de Yucatán, que, según la terminología maya y su equivalente de la FAO – UNESCO (1970), citados por Ortiz (1997) corresponden a: T'zekel (Litosol), Kakab (Rendzina); K'ankab (Luvisol crómico), Yax-hoom (Vertisol pélico), Ak'alche (Vertisol gleyco) y Sabana (Gleysol) (Chavelas, 1976; García, 1998; García *et al.*, 1998).

En la región existen los siguientes tipos de vegetación (Chavelas, 1976; García, 1998; García *et al.*, 1998): selva mediana subperennifolia, en suelos someros (T'zekel y K'ankab); selva mediana subperennifolia, sobre suelos profundos (Yax-hoom); selva baja caducifolia, en suelos temporalmente inundables (conocidos comúnmente como bajos o Ak'alche); sabanas, en áreas inundadas casi en forma

permanente (Gleysol). Así mismo, hay asociaciones de manglares y palmares a las orillas de las lagunas en lugares con humedad alta y suelos profundos.

Base de datos

Se utilizó información de ocho plantaciones de *Cedrela odorata* clasificadas por tipo de suelos y 18 mediciones y remediciones de las mismas, con edades entre 3 y 28 años, establecidas en el Sitio Experimental "San Felipe Bacalar" y los ejidos de Lázaro Cárdenas II, Juan Sarabia y Laguna Guerrero en Quintana Roo, México (Figura 1). Las mediciones del diámetro normal se hicieron con cinta diamétrica y la altura total con clinómetro Suunto®. Las variables registradas fueron: edad, diámetro normal (1.30 m sobre la base del árbol), altura total y tipo de suelo de acuerdo a la clasificación maya.

Modelo de Índice de Sitio

Se realizó un análisis estadístico para generar la familia de curvas anamórficas y polimórficas mediante el método de la curva guía, el cual consiste en ajustar en forma analítica una expresión matemática para obtener una curva promedio para todo el intervalo de observaciones altura dominante – edad. A partir de ella se trazaron otras proporcionales arriba y abajo de la curva guía, las cuales representan diferentes índices de sitio (Cuadro 1).

Para analizar los datos y generar las fórmulas se aplicaron técnicas de regresión no lineal mediante el Método de Mínimos Cuadrados con los procedimientos NLIN (Regresión no lineal) y la opción DUD (sin uso de derivadas) del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 1992). Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo fueron: Cuadrado Medio de Residuales y Pseudo R^2 .

Las familias de curvas anamórficas o polimórficas se construyeron despejando los parámetros de escala o de forma de la ecuación generada, ya que éstos definen el tipo al que corresponden (Cuadro 1).

i) Curvas anamórficas.- De la fórmula de índice de sitio se despejó el parámetro asintótico, su expresión se sustituyó en la ecuación original, con lo que éste se consideró implícito y el o los parámetros de forma son comunes para todos los sitios. Al variar la edad y el índice de sitio deseado, pero manteniendo constante la edad base, se generó la familia de curvas anamórficas. A continuación se resume el proceso y las ecuaciones se presentan en el Cuadro 1.

- 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) se hace igual a la edad base (E_0), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS).

Cuadro 1. Ecuaciones de crecimiento en altura dominante, índice de sitio, familias de curvas y calificación de índice de sitio para plantaciones de *Cedrela odorata* en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

| Modelo | Ecuación Integral | IS | Familia de curvas | Calificación de IS |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|---|
| Schumacher (anamórfica) | $H = B_0 e^{-\beta_0 E^{-1}}$ | $IS = B_0 e^{-\beta_0 E_0^{-1}}$ | $H = ISe^{-\beta_0 (E_0^{-1} - E^{-1})}$ | $IS = He^{-\beta_0 (E_0^{-1} - E^{-1})}$ |
| Schumacher (polimórfica) | $H = B_0 e^{-\beta_0 E^{-1}}$ | $IS = B_0 e^{-\beta_0 E_0^{-1}}$ | $H = B_0 \left(\frac{IS}{B_0} \right)^{\frac{E_0}{E}}$ | $IS = B_0 \left(\frac{H}{B_0} \right)^{\frac{E}{E_0}}$ |

H = Altura dominante; E_0 = Edad base (años); β_0 = Parámetros asintótico; $\beta_0 \neq$ Pendiente de las curvas; IS = Índice de sitio; E = Edad (años); Ecuación integral; Ecuación de Índice de Sitio, Ecuación para generar familias de curvas; Ecuación para calificar el Índice de Sitio.

- c) Como β_0 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_0 de la ecuación y su expresión se sustituye en las ecuaciones integrales, con lo que se obtiene la expresión para generar las familias de curvas anamórficas de índice de sitio, sustituyendo las etiquetas del índice de sitio deseado, mismas que deben estar acordes con la dispersión de los datos observados.
- d) Para calificar la calidad de sitio de un rodal, conocida la edad y la altura dominante, se despeja IS de las ecuaciones que generan las familias de curvas (Cuadro 1).

ii) Curvas polimórficas.- Para graficar la familia de curvas polimórficas, de la ecuación integral ⁽¹⁾ se despeja β_1 (parámetros dependientes del sitio por ejemplo velocidad de crecimiento) y resultan las expresiones del Cuadro 1 ^(2, 3 y 4). Estas fórmulas sirvieron para calificar el índice de sitio para cada plantación. El valor asintótico se considera constante para todos los lugares y lo que varía es la velocidad del crecimiento.

Los pasos para su construcción son los siguientes:

- a) Las ecuaciones de crecimiento en su forma integral ⁽¹⁾ se ajustan a la base de datos para generar la curva guía.
- b) Cuando la edad (E) se hace igual a la edad base (E_0), entonces la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS) ⁽²⁾.
- c) De la ecuación de IS se despeja β_1 y se sustituye en las ecuaciones integrales, con lo que se obtienen las expresiones que generan las familias de curvas polimórficas mediante el método de la curva guía ⁽³⁾.
- d) Al despejar el índice de sitio de la expresión correspondiente a la familia de curvas, se genera la que califica el índice de sitio para un rodal que crece en un lugar específico ⁽⁴⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de la altura dominante de las plantaciones evaluadas

En la Figura 2 se ordenan los pares de datos de altura dominante-edad de 1,351 observaciones. La selección del número de árboles dominantes y codominantes en cada plantación se realizó con base en los criterios mencionados por Alder (1980) y Clutter *et al.* (1983) los cuales indican que en una superficie de 1 ha se deben escoger los 100 ejemplares con dichas características. En las plantaciones de menor superficie, el número de árboles fue proporcional a la misma.

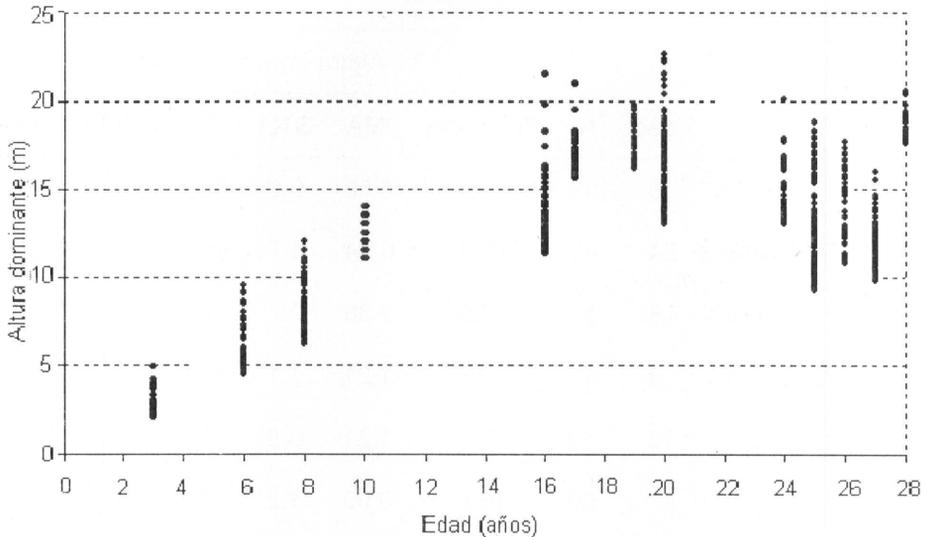


Figura 2. Dispersión de los datos observados de altura dominante en *Cedrela odorata*.

En el Cuadro 2 se muestran los estadísticos básicos de la altura dominante. De acuerdo al incremento promedio anual, en los suelos Pus-lum (Rendzina) los árboles tuvieron valores mayores, siguiéndoles los que crecieron en T´zekel (Litosol), Yax-hoom (Vertisol) y los presentes en un suelo combinado Pus-lum-Yax-hoom (pus yax), respectivamente.

Los resultados sugieren una diferencia del crecimiento de las plantaciones en función del suelo. Así, los mejores tipos para el establecimiento de cedro rojo son los Pus-lum y T´zekel. Al respecto, se tienen evidencias de que la distribución natural de la especie es más representativa en la parte centro y norte del estado de Quintana Roo, donde predominan esos suelos con drenaje excesivo (Glogiewicz, 1998).

Análisis de varianza

Se ajustó el modelo de Schumacher y se obtuvo una ecuación que permite predecir la altura dominante en función de la edad (cuadros 3, 4 y 5).

Con base en el nivel de significancia del modelo ($\alpha = 0.0001$), se concluyó que es válido para predecir la altura dominante en función de la edad y es posible calificar la productividad de los suelos con el índice de sitio como indicador.

Cuadro 2. Características y estadísticos básicos de la altura de árboles dominantes de *Cedrela odorata* en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

| Plant | Suelo | Edad | N | Altura dominante (m) | | | | | |
|-------|----------|------|-----|----------------------|------|-----|------|------|------|
| | | | | Promedio | IMA | STD | CV | MAX | MIN |
| 1 | Yax-hoom | 3 | 109 | 2.4 | 0.80 | 0.5 | 19.8 | 4.9 | 2.1 |
| 2 | Yax-hoom | 24 | 40 | 15.3 | 0.64 | 1.7 | 11.0 | 20.1 | 13.1 |
| 3 | Pus-lum | 6 | 51 | 8.3 | 1.38 | 0.7 | 9.0 | 9.5 | 7.5 |
| 3 | Pus-lum | 8 | 61 | 9.7 | 1.21 | 1.1 | 10.8 | 12.0 | 8.5 |
| 3 | Pus-lum | 10 | 50 | 12.1 | 1.21 | 0.9 | 7.5 | 14.0 | 11.0 |
| 3 | Pus-lum | 17 | 50 | 16.8 | 0.99 | 1.2 | 6.9 | 21.0 | 15.6 |
| 3 | Pus-lum | 19 | 52 | 17.5 | 0.92 | 1.1 | 6.2 | 19.8 | 16.2 |
| 3 | Pus-lum | 20 | 51 | 18.2 | 0.91 | 1.8 | 9.9 | 22.7 | 16.1 |
| 4 | Pus-lum | 25 | 102 | 11.2 | 0.45 | 1.5 | 13.2 | 15.3 | 9.2 |
| 4 | Pus-lum | 27 | 103 | 11.6 | 0.43 | 1.4 | 11.9 | 16.0 | 9.8 |
| 5 | Pus-lum | 25 | 27 | 16.5 | 0.66 | 1.0 | 5.9 | 18.8 | 15.5 |
| 5 | Pus-lum | 28 | 29 | 18.6 | 0.66 | 0.8 | 4.5 | 20.6 | 17.6 |
| 6 | Pus-lum | 26 | 41 | 14.0 | 0.54 | 1.9 | 13.5 | 17.7 | 10.8 |
| 7 | Pus-Yax | 6 | 108 | 5.1 | 0.85 | 0.7 | 14.0 | 8.0 | 4.5 |
| 7 | Pus-Yax | 8 | 111 | 7.3 | 0.91 | 1.0 | 13.1 | 10.0 | 6.2 |
| 7 | Pus-Yax | 16 | 106 | 12.9 | 0.81 | 1.8 | 13.6 | 21.5 | 11.3 |
| 7 | Pus-Yax | 20 | 103 | 14.7 | 0.74 | 1.5 | 10.3 | 20.9 | 13.1 |
| 8 | T'zekel | 8 | 34 | 9.3 | 1.16 | 0.7 | 7.4 | 11.0 | 8.5 |

Plant = Plantación; N = Número de árboles; IMA = Incremento medio anual en altura (m/año); STD = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación; MÁX = Máximo (m); MIN = Mínimo (m); Pus-Yax = Pus - lum - Yax-hoom.

Cuadro 3. Análisis de varianza para construir curvas de índice de sitio para *Cedrela odorata* en algunas plantaciones de Quintana Roo, México

| FV | GL | SC | CM |
|--------------------|------|--------------|-------------|
| Regresión | 2 | 176902.92500 | 88451.46250 |
| Residual | 1348 | 8538.39740 | 6.33412 |
| Total no corregido | 1350 | 185441.32240 | |
| Corregido total | 1349 | 29456.02647 | |

FV = Fuente de variación; GL = Grados de libertad; SC = Suma de cuadrados; CM = Cuadrados Medios.

Cuadro 4. Características de las curvas de índice de sitio para *Cedrela odorata* en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

| Parámetro | Estimado | Error estándar asintótico | Intervalos de confianza asintóticos (95%) | |
|-----------|-------------|------------------------------|--|-------------|
| β_0 | 19.02571753 | 0.21761819 | 18.59880301 | 19.45263205 |
| β_1 | -6.38354776 | 0.15453373 | -6.68670574 | -6.08038979 |

Matriz de correlación asintótica

| Correlación | β_0 | β_1 |
|-------------|-------------|-------------|
| β_0 | 1 | -0.84317249 |
| β_1 | -0.84317249 | 1 |

β_0 = Asíntota; β_1 = Pendiente.

El Cuadrado Medio de Residuales fue bajo. En el presente estudio se utilizó para el ajuste de la regresión el Método de Mínimos Cuadrados, en consecuencia, cuando se minimiza el Cuadrado Medio del Residual y se detectan valores pequeños, el modelo explica con mayor precisión los datos observados.

Otro criterio trascendente para comprobar la bondad de ajuste de un modelo es el valor del Pseudo Coeficiente de Determinación (Pseudo R^2). En este caso la Pseudo R^2 fue 0.84, el cual se considera relativamente alto. De acuerdo

con Clutter *et al.* (1983), cuando se ajustan curvas de índice de sitio, no se discriminan datos, ya que el objetivo es obtener un patrón de cómo crecerían los árboles a lo largo de su vida, por lo que es común que los valores de R^2 en las ecuaciones sean bajos.

Al verificar el cumplimiento de los supuestos de regresión, se observó que hay normalidad de los errores en el modelo linealizado, puesto que la prueba de Shapiro - Wilk (W : Normal = 0.973373) es altamente significativa ($Pr < W = 0.0001$). Tampoco hubo autocorrelación en los errores ya que el valor del estadístico de Durban Watson ($DW = 1.18$) es cercano a 2 (SAS, 1992). Además, los residuales se comportaron como una línea recta respecto de la normal y sus porcentajes se asemejan a una campana de Gauss (SAS, 1992) (Figura 3).

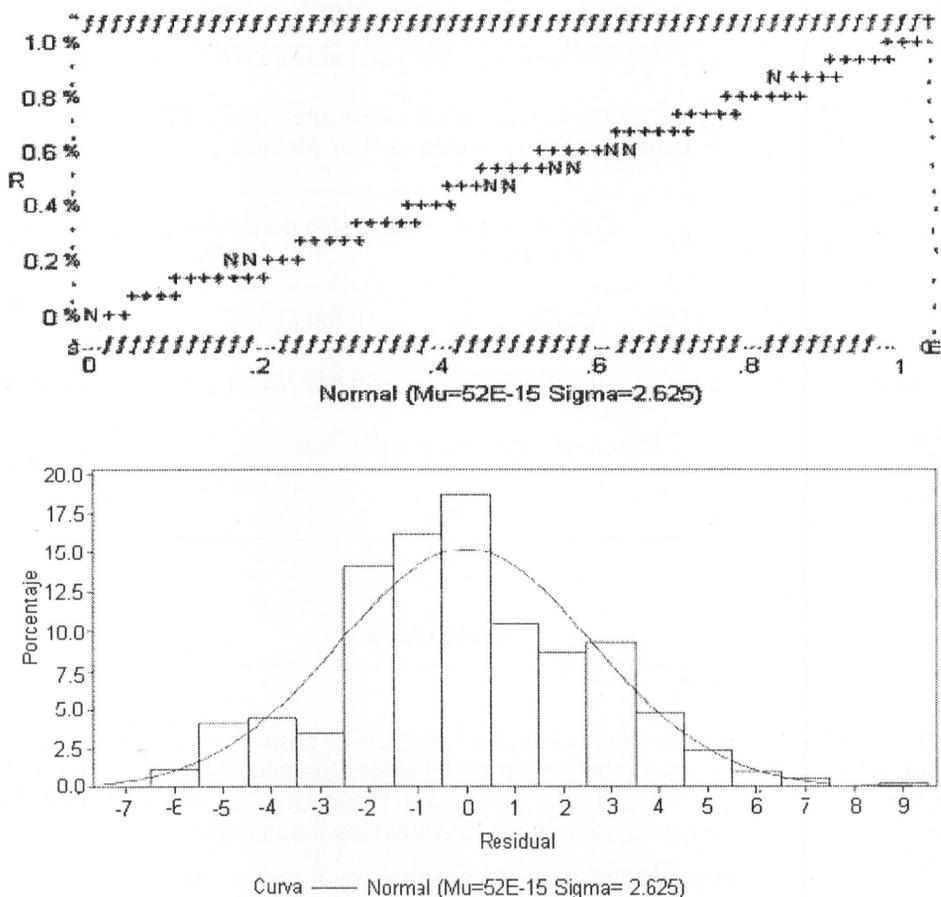


Figura 3. Pruebas gráficas de normalidad para distribución de residuales de los datos de altura dominante de *Cedrela odorata*.

Ecuación generada

La ecuación que resultó para predecir la altura dominante de cedro rojo es la siguiente:

$$H = B_0 e^{-B_1 E^{-1}}$$

$$H = 19.02571753 e^{-6.38354776 E^{-1}}$$

En la expresión anterior, el parámetro β_0 corresponde al valor asintótico (Cuadro 1) o máxima altura que los árboles alcanzan (teóricamente a una edad infinita), en este caso a la edad de 28 años, pues representa el universo de datos de altura dominante-edad utilizadas para el ajuste de la ecuación.

El parámetro β_1 (Cuadro 4) se considera dependiente del sitio y representa la velocidad de crecimiento o el número de unidades que aumenta β_0 cuando varía una unidad en β_1 , adecuando las escalas con la forma exponencial.

Estimación de la altura dominante

A partir de la ecuación generada se estima la altura dominante en las plantaciones de cedro rojo, en un intervalo de edades de uno a 28 años. Por ejemplo, para los 16 años, se sustituye la edad en la ecuación y resulta una altura dominante de 12.77 m (Figura 4).

Estimación del índice de sitio

Cuando la edad (E) es igual a la edad base (E_0), misma que se definió como la correspondiente al turno definido por los plantadores del estado, la altura dominante (H) será igual al índice de sitio (IS). La edad base se sustituye en la ecuación:

$$IS = B_0 e^{-B_1 E_0^{-1}}$$

$$IS = 19.02571753 e^{-6.38354776 (20^{-1})} = 13.82 \text{ m} \approx 14 \text{ m}$$

Es decir, para una misma plantación que actualmente tiene 16 años de edad y una altura dominante de 12.77 m, a la edad base de 20 años, se esperaría que tuviera un índice de sitio de 14 m, o sea que, a dicha edad alcanzará una altura de 14 m.

Generación de familias de curvas anamórficas

Un aspecto importante a considerar antes de generar la familia de curvas es la elección de la edad base. En el presente estudio se eligió la de 20 años porque

$$H = 19.02571753e^{-638354776(16^{-1})} = 12.77 \text{ m.}$$

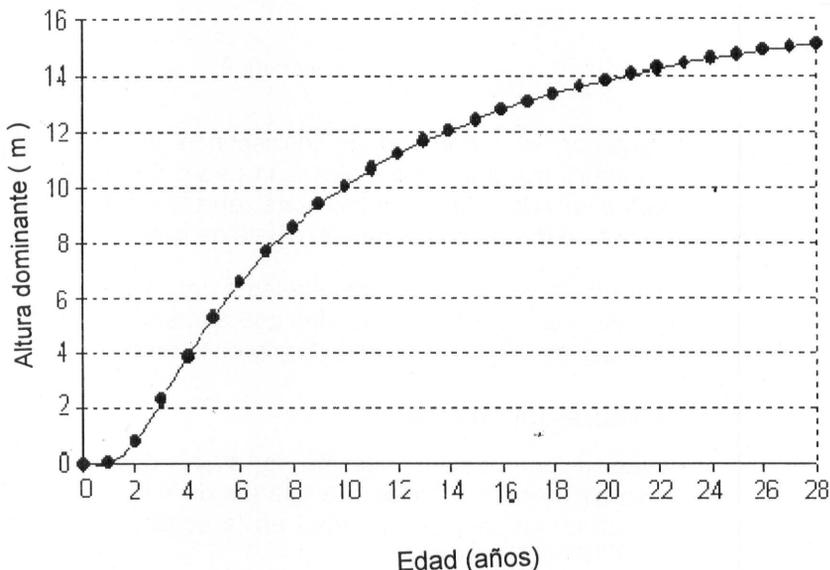


Figura 4. Altura dominante para *Cedrela odorata* en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

en la región los programas de plantaciones forestales comerciales de cedro han fijado un turno técnico con esa duración, lapso en el que se espera que los árboles adquieran un diámetro y un fuste de tamaño comercial.

De las expresiones de índice de sitio se despeja el parámetro asíntótico y se sustituye en la ecuación integral; el valor asíntótico está implícito y el o los parámetros de forma son comunes para todos los sitios. La ecuación utilizada es:

$$H = ISe^{-6.38354776(E_0^{-1}-E^{-1})}$$

Una vez seleccionada la edad base y definida la tendencia de la curva guía, así como los números de clases de calidad de sitio y la equidistancia entre ellas, se procedió a trazar sus respectivas curvas, obteniendo los datos

que se ilustran en la Figura 5a. En todos los casos la curva guía corresponde al índice de sitio de 14 m.

Las curvas se caracterizan por presentar la misma forma, es decir, guardan la misma proporción en cualquiera de sus puntos. Los de inflexión se observan a la misma edad, ya que tienen igual pendiente, por lo que el incremento es proporcional para todos los sitios (Figura 5a).

El punto de inflexión o la edad a la cual ocurre el máximo incremento corriente anual (ICA) es a los 3.19 años, mientras que a los 6.38 años se verifica el máximo incremento medio anual (IMA) y coincide con el ICA, ambos determinados de forma analítica.

Generación de familias de curvas polimórficas

Se acepta que β_0 es un parámetro dependiente del sitio, representa la velocidad de crecimiento y el IS es igual a la altura a la edad base. Para elaborar la familia de curvas polimórficas (Cuadro 1), mediante manipulación algebraica se despejó β_1 , se sustituyó en la ecuación integral y se obtuvo la expresión:

$$H = 19.02571753 \left(\frac{IS}{19.02571753} \right)^{\left(\frac{E_0}{E} \right)}$$

En la Figura 5b se advierte que los puntos de inflexión para cada índice de sitio ocurren a diferentes edades y tanto los valores asintóticos, como los incrementos máximos se manifiestan primero en los sitios de mayor calidad.

Las curvas sobreestiman el crecimiento en altura de los árboles con índices de sitio de mayor calidad a edades tempranas (por ejemplo: las curvas de índice de sitio igual a 17) y los subestima en calidades de sitio pobres (la curva de índice de sitio igual a 11).

Calificación de índice de sitio

Las ecuaciones generadas en las versiones anamórficas y polimórficas para calificar el índice de sitio son las siguientes:

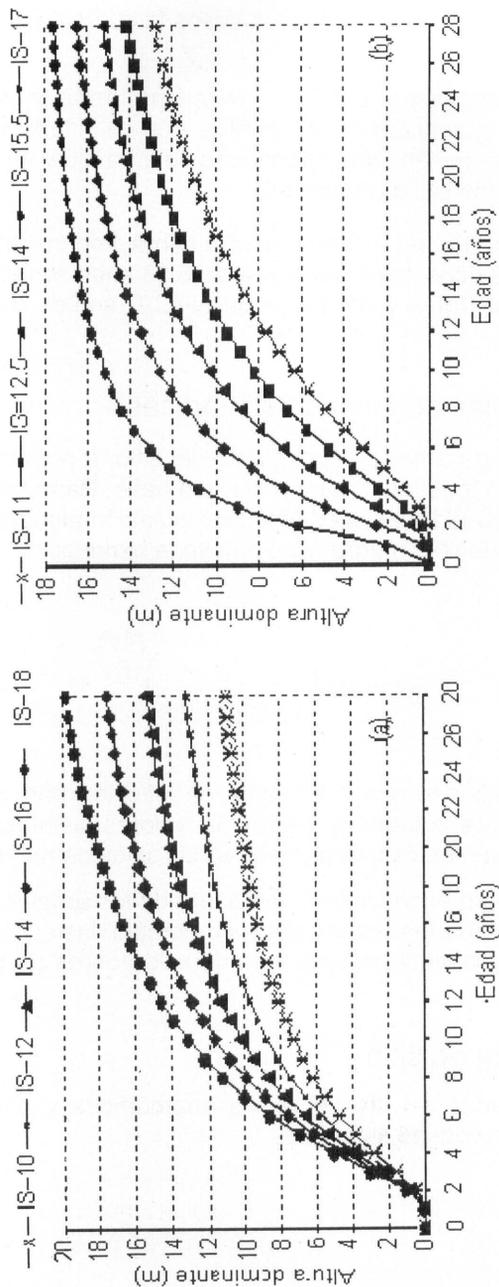


Figura 5. Familias de curvas anamórficas (a) y polimórficas (b) de índice de sitio para *Cedrela odorata*, a la edad de 20 años en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

Anamórfica:
$$IS = H e^{-6.38354776 \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right)}$$

Polimórfica:
$$IS = 19.02571753 \left(\frac{H}{19.02571753} \right)^{\frac{E}{E_0}}$$

Sí de una plantación de 25 años de edad, que crece en un suelo tipo Pus-lum (Cuadro 5) y que en ese momento tiene una altura dominante de 16.5 m, se desea conocer su productividad (índice de sitio) a una edad base de 20 años, en la ecuación anamórfica, se sustituyen los valores conocidos como se indica a continuación:

$$IS = 16.5 e^{-6.38354776 \left(20^{-1} \cdot 25^{-1} \right)} = 15.48 \text{ m}$$

Lo anterior significa que a la edad base de 20 años se espera que la plantación tenga una altura dominante de 15.48 m y le corresponde un índice de sitio de 15 m (Cuadro 5 y Figura 5a).

La versión polimórfica, para el mismo dato resulta en (Cuadro 4 y la Figura 5b):

$$IS = 19.02571753 \left(\frac{16.5}{19.02571753} \right)^{\frac{25}{20}} = 15.92 \text{ m.}$$

A partir del Cuadro 4 se deduce que, en promedio, los índices de sitio anamórficos para los suelos Pus-lum son de 15.47 m, para el T'zekel es de 15.01 m, para el Yax-hoom de 14.58 m y para la combinación Pus-lum-Yax-hoom de 12.80 m. Los promedios de índices de sitios polimórficos para Pus-lum son de 14.92 m, para T'zekel de 14.29 m, para Yax-hoom de 12.30 m y por último Pus-lum-Yax-hoom de 13.61 m. Se observa que en general los valores anamórficos son mayores que los polimórficos; no obstante que estos últimos sobrestiman el crecimiento en altura de los árboles desarrollados en lugares con índices de sitio de mayor calidad a edades tempranas. Sin embargo las plantaciones evaluadas corresponden a diferentes calidades de sitio y los datos son promedios.

Los suelos de tipo Pus-lum y T'zekel constituyen el mejor sustrato para el establecimiento de plantaciones de *Cedrela odorata* en el sur de Quintana Roo.

Cuadro 5. Calificación del índice de sitio para *Cedrela odorata* a la edad base de 20 años en algunas plantaciones de Quintana Roo, México.

| Planta | Suelo | Altura (m) | Edad (años) | IS anamórfico | IS polimórfico |
|--------|------------------|------------|-------------|---------------|----------------|
| 1 | Yax-hoom | 2.4 | 3 | 14.64 | 13.95 |
| 2 | Yax-hoom | 15.3 | 24 | 14.51 | 14.65 |
| 3 | Pus-lum | 8.3 | 6 | 17.48 | 14.83 |
| 3 | Pus-lum | 9.7 | 8 | 15.66 | 14.53 |
| 3 | Pus-lum | 12.1 | 10 | 16.65 | 15.17 |
| 3 | Pus-lum | 16.8 | 17 | 17.77 | 17.12 |
| 3 | Pus-lum | 17.5 | 19 | 17.80 | 17.57 |
| 3 | Pus-lum | 18.2 | 20 | 18.20 | 18.20 |
| 4 | Pus-lum | 11.2 | 25 | 10.51 | 9.81 |
| 4 | Pus-lum | 11.6 | 27 | 10.68 | 9.75 |
| 5 | Pus-lum | 16.5 | 25 | 15.48 | 15.92 |
| 5 | Pus-lum | 18.6 | 28 | 16.98 | 18.43 |
| 6 | Pus-lum | 14.0 | 26 | 13.00 | 12.77 |
| 7 | Pus-lum-Yax-hoom | 5.1 | 6 | 10.74 | 12.82 |
| 7 | Pus-lum-Yax-hoom | 7.3 | 8 | 11.78 | 12.97 |
| 7 | Pus-lum-Yax-hoom | 12.9 | 16 | 13.97 | 13.94 |
| 7 | Pus-lum-Yax-hoom | 14.7 | 20 | 14.70 | 14.70 |
| 8 | T'zekel | 9.3 | 8 | 15.01 | 14.29 |

IS = Índice de sitio

Comparación de las familias de curvas

La comparación de ambos métodos de construcción de las familias de curvas se realizó con base en la fidelidad con que representan a los valores observados. En la Figura 6a se muestra que, en general, las curvas anamórficas de índice de sitio estimadas cubren la tendencia del intervalo de dispersión de la nube de los datos considerados, por lo que se acepta que el método propuesto es bueno para los propósitos del estudio. Algunos puntos reales quedan fuera debido a que se trata de plantaciones atípicas que, de acuerdo con Clutter *et al.* (1983), no se eliminan para efectos de mejorar los ajustes de las ecuaciones.

Para las curvas polimórficas, la Figura 6b describe que a edades tempranas, las curvas de índice de sitio generadas para la clase más pobre (IS = 11) estiman valores por defecto y la más alta lo hace para valores por exceso (IS = 17), de forma notable; a edades mayores, las curvas generadas para clases de índice de sitio altas tienden a subestimar los valores observados.

En las figuras 6a y 6b se aprecia que las clases de índice de sitio para las curvas anamórficas son más grandes que las polimórficas, ya que a medida que las clases son iguales a las obtenidas en las anamórficas, las estimaciones tienden a ser menos reales y, como el crecimiento es muy acelerado en las primeras edades, el incremento termina antes de un año y no se observa la culminación para la curva de mayor calidad de sitio.

Las ecuaciones generadas deben ser aplicadas dentro del intervalo de las variables dimensionales y las edades consideradas en este trabajo. No debe incluirse información de plantaciones jóvenes (inferiores a cinco años), ya que esos árboles todavía experimentan un rápido incremento en altura y los datos procedentes de su medición influyen en el ajuste del modelo; en consecuencia, no funcionan como un buen indicador de la calidad sitio.

CONCLUSIONES

Mediante el método de la curva guía y el modelo de Schumacher es posible construir curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio para plantaciones forestales de *Cedrela odorata*; por lo tanto, se formuló una ecuación que permite predecir la altura dominante en función de la edad.

Las curvas polimórficas generadas sobreestiman el crecimiento en altura de los árboles para rodales con índice de sitio de mayor calidad a edades tempranas y lo subestiman en calidades de sitio pobres.

Las familias de curvas anamórficas de índice de sitio representan con más fidelidad el intervalo de dispersión de los valores, por lo que son las adecuadas para calificar el índice de sitio de plantaciones forestales de *Cedrela odorata* en el sur de Quintana Roo.

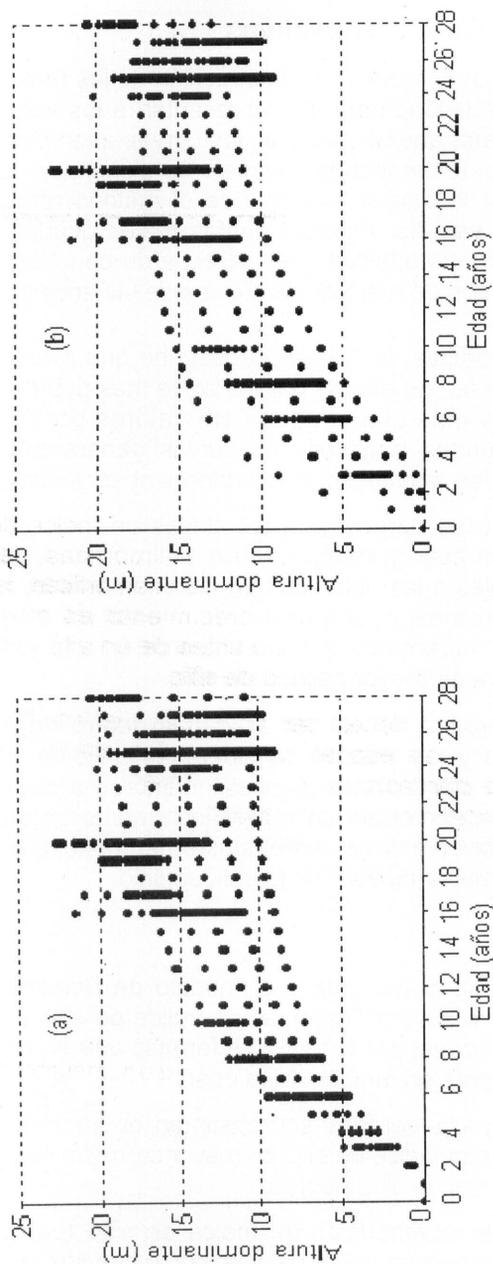


Figura 6. Comparación gráfica de valores observados y predichos de las familias de curvas anamórficas (a) y polimórficas (b) de índice de sitio para *Cedrela odorata*, a la edad base de 20 años en algunas plantaciones de Quintana Roo, México

Los suelos de tipo Pus-lum y T'zekel constituyen el mejor sustrato para el establecimiento de plantaciones de *Cedrela odorata* en el sur de Quintana Roo.

Las ecuaciones generadas deben ser aplicadas dentro del intervalo de las variables dimensionales y las edades consideradas en este estudio.

REFERENCIAS

- Acosta M., M. 1991. Modelo de crecimiento para *Pinus montezumae* Lamb., en el C. E. F. "San Juan Tetla", Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Edo. de Méx. México. 80 p.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 2. Predicción del rendimiento. Organización de las Naciones para la Agricultura y la Alimentación. FAO: Comité de Montes. Roma, Italia. 118 p.
- Avery T., E. and H. E. Bukhart. 1983. Forest measurements. Mc Graw Hill Co. New York, NY. USA. 331 p.
- Benavides S., J. D. y H. Manzanilla B. 1993. Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio de *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el A. D. F. Tapalpa, Estado de Jalisco. Rev. Cienc. For. en Méx. 18(74): 121-138.
- Carmean, W. H. and D. J. Lenthall. 1989. Height growth and site index curves for jack pine in North Central Ontario. Can. J. For. Res. 19 (2):215-224.
- Chavelas P., J. 1976. Campo Experimental Forestal San Felipe Bacalar. Ciencia Forestal. INIF. 1 (3): 65-74.
- Clutter J., L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY. USA. 333 p.
- Gondit, R., S. P. Hubbell, J. V. Frankie, R. Sukumar, N. Manokaran, R. B. Foster and P. S. Ashton. 1996. Species-area and species-individual relationships for tropical trees – a comparison of three 50 ha plots. Journal of Ecology 84(4): 549-562.
- Davis, S. L. and K. N. Johnson. 1987. Forest management. McGraw-Hill Co. New York, NY. USA. 730 p.
- García C., X. 1998. Predicción del rendimiento de *Swietenia macrophylla* King. (Caoba) en plantaciones forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de Méx., México. 114 p.
- García C., X., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., J. Jasso M. y C. A. Ortiz S. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. Rev. Cienc. For. en Méx. 23(84): 9-18.

- García, E. 1983. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, D. F. México. 252 p.
- Glogiewicz, J. 1998. *Cedrela odorata* L. In: Árboles útiles de la región tropical de Norteamérica. Washington. D. C. USA. 291 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1986. Anuario estadístico del estado de Quintana Roo. Gobierno del Estado de Quintana Roo. México. 728 p.
- 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, Edo. de Méx. México. 115 p.
- Ortiz S., C. A. 1997. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Edafología. Montecillos. Edo. de Méx. México. 85 p.
- Potts, M. D., P. S. Ashton, L. S. Kaufman and J. B. Plotkin. 2002. Habitat patterns in tropical rain forests: a comparison of 105 plots in Northwest Borneo. *Ecology* 83 (10): 2782-2789.
- Pritchett W., L. 1986. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Ed. Limusa. México, D. F. México. pp. 307-334.
- Pritchett, W. L. and R. H. Fisher. 1987. Properties and management of forest soils. John Wiley & Sons, Inc. 2nd ed. New York, NY. USA. 494 p.
- Spurr S., H. y B. V. Barnes. 1982. Ecología forestal. A.G.T. Editor. México, D. F. México. 690 p.
- Stage A., R. 1963. A mathematical approach to polymorphic site index curves for Grand fir. *For. Sci.* 9(2):167-180.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute. 1992. SAS/STAT User's Guide. Release 6.03-Edition. Cary, NC. USA. 1028 p.
- 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.