

**Serie Técnica**  
**BOLETIN TECNICO No. 22**

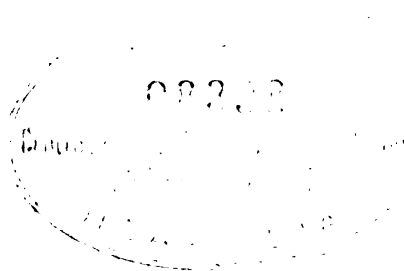
**MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE**  
***Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y**  
***Leucaena leucocephala* EN AMÉRICA CENTRAL**

**David A. Hughell**

**Publicación patrocinada por el**  
**Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple, MADELEÑA**  
**CATIE-ROCAP 596-0117**

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA,**  
**CATIE**  
**Programa de Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido**  
**Área de Producción Forestal y Agroforestal**  
**Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple, MADELEÑA**  
**Turrialba, Costa Rica, 1990**

**El CATIE es una institución de carácter científico y educacional , cuyo propósito fundamental es la investigación y la enseñanza de posgrado en el campo de las ciencias agropecuarias y de los recursos naturales renovables aplicados al trópico americano, particularmente en los países de América Central y el Caribe.**



**1990, Centro Agronómico Trópicl de Investigación y Enseñanza, CATIE  
ISBN 9977-57-079-5.**

634.9809728

H892

Hughell, David A.

Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de cuatro especies de árboles de uso múltiple en América Central /David Hughell. Turrialba, C.R.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa de Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido, 1990.

70 p.; 23 cm. (Serie Técnica. Boletín Técnico /CATIE; no. 22)

ISBN 9977 - 57 - 079.5

1. Arboles de uso múltiple - América Central  
I. CATIE Programa de Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido II. Título III. Serie.

## PRESENTACION

El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, junto con las instituciones forestales de América Central, desarrollan, desde 1980, investigación silvicultural con especies de crecimiento rápido y propósito múltiple, con el objetivo de conocer el comportamiento y posibilidades de las mismas en la Región, para incorporarlas a los sistemas de finca de los pequeños y medianos agricultores. El Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELEÑA) está promoviendo esta incorporación como una de las estrategias para mejorar la economía de los sistemas de finca de los pequeños y medianos agricultores de la región centroamericana. El propósito del Proyecto es aumentar los ingresos y mejorar el bienestar de las familias rurales, así como contribuir a disminuir el deterioro ambiental en América Central y Panamá, mediante un incremento significativo del cultivo de árboles de propósito múltiple, para la utilización en la propia finca y para la venta de productos forestales en los mercados locales.

El incremento del cultivo de estas especies dependerá del conocimiento que se tenga, a todo nivel, de la importancia de las mismas, de las formas de cultivo, de los métodos de manejo silvicultural de las plantaciones y combinaciones agroforestales establecidas con ellas y por supuesto, de los crecimientos y rendimientos que se podrán obtener de su cultivo. Consciente de la necesidad de este conocimiento, el Proyecto MADELEÑA inició la preparación de "Modelos para la Predicción del Crecimiento y Rendimiento de 14 de las Especies Prioritarias". Este documento presenta los modelos desarrollados para la predicción del crecimiento y rendimiento de cuatro especies de árboles de propósito múltiple, de uso generalizado en América Central: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Gilricida seplum* Jacq., *Guazuma ulmifolia* Lamb. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Los modelos que se presentan integran la información generada por la red de parcelas permanentes de crecimiento que el Proyecto MADELEÑA tiene establecida en América Central, pretende ser de uso generalizado para la Región, como una herramienta útil que permita facilitar la toma de decisiones sobre los crecimientos de las especies en diversas condiciones climáticas y de sitio, permitiendo proyectar los costos y beneficios sobre bases cuantitativas de las etapas de cultivo de las plantaciones, así como permitir la aplicación de decisiones sobre programas de desarrollo basados en la reforestación con árboles de uso múltiple.

El CATIE cumple así con el compromiso institucional de poner al servicio de los países miembros los conocimientos generados por la investigación, contribuyendo de esta manera al desarrollo agropecuario acelerado y sostenido de la Región y al mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes de menores recursos. El Proyecto MADELEÑA pone a disposición de los agricultores, técnicos en extensión, técnicos forestales, autoridades del sector y reforestadores el presente manual técnico que incluye los modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricida sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central.

Miguel Angel Musálem  
Silvicultor Principal  
Proyecto MADELEÑA

Rodolfo Salazar  
Líder de Proyecto  
Proyecto MADELEÑA

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN   | 1  |
| INTRODUCCION  | 3  |
| METODOLOGIA   | 5  |
| 1. Organización de la información en resúmenes por medición | 7  |
| 2. Estimación del índice de sitio                           | 9  |
| 3. Estimación de la densidad actual                         | 10 |
| 4. Estimación de la altura media                            | 11 |
| 5. Estimación del diámetro                                  | 12 |
| 6. Ecuación para estimar la producción                      | 13 |
| 7. Incorporación de la serie de ecuaciones al modelo global | 13 |
| 8. Verificación y validación del modelo                     | 14 |
| MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO    | 15 |
| <b><i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.</b>               | 15 |
| 1. Manejo de los datos de crecimiento                       | 15 |
| 2. Modelo de predicción                                     | 17 |
| 3. Validación del modelo                                    | 25 |
| <b><i>Glicicida sepium</i> Jacq</b>                         | 26 |
| 1. Manejo de los datos de crecimiento                       | 26 |
| 2. Modelo de predicción                                     | 27 |
| 3. Validación del modelo                                    | 33 |
| <b><i>Guazuma ulmifolia</i> Lamb.</b>                       | 33 |
| 1. Manejo de los datos de crecimiento                       | 34 |
| 2. Modelo de predicción                                     | 35 |
| 3. Verificación   | 41 |
| <b><i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit</b>           | 41 |
| 1. Manejo de los datos de crecimiento                       | 41 |

|                                       |                                      |           |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 2.                                    | Modelo de predicción                 | 43        |
| 3.                                    | Verificación y validación del modelo | 48        |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> |                                      | <b>51</b> |
| 1.                                    | Aplicación de los modelos generados  | 52        |
| 2.                                    | Recomendaciones                      | 53        |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>                   |                                      | <b>55</b> |

## INDICE DE CUADROS

|         |   |    |
|---------|---|----|
| No. 1.  | Descripción de las variables de resúmenes, por medición y parcela utilizadas en el desarrollo de modelos de predicción del crecimiento y rendimiento.                     | 7  |
| No. 2.  | Ambitos de las variables incluídas para resúmenes por medición para 117 parcelas de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> utilizadas*.  | 17 |
| No. 3.  | Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en América Central.                      | 18 |
| No. 4.  | Tablas de rendimiento de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para índices de sitio de 10, 14 y 18, y para densidades iniciales de 1111, 1600, 2500 árboles por hectárea.      | 21 |
| No. 5.  | Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 19 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado). | 25 |
| No. 6.  | Ambitos de las variables incluídas para resúmenes por medición para 128 parcelas de <i>Gliricidia sepium</i> *.   | 27 |
| No. 7.  | Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <i>Gliricidia sepium</i> en América Central.                             | 28 |
| No. 8.  | Tablas de rendimiento de <i>Gliricidia sepium</i> para índices de sitio de 3, 5 y 7, y para una densidades de plantación de 2500 árboles por hectárea.                    | 32 |
| No. 9.  | Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 21 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado). | 33 |
| No. 10. | Ambitos de las diferentes variables de resúmenes por medición para 37 parcelas de <i>Guazuma ulmifolia</i> utilizadas*.   | 35 |
| No. 11. | Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <i>Guazuma ulmifolia</i> en América Central.                             | 36 |
| No. 12. | Ecuaciones para estimar biomasa (en kg secos por árbol) de <i>Guazuma ulmifolia</i> con base en 173 árboles cuantificados.  | 37 |
| No. 13. | Tablas de rendimiento de <i>Guazuma ulmifolia</i> para índices de sitio de 4, 6 y 8 m y una densidad de plantación de 2500.   | 40 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| No. 14. | Resultados de la verificación del modelo de predicción para <i>Guazuma uimifolia</i> con las parcelas utilizadas para construir un modelo (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado). | 41 |
| No. 15. | Ambitos de las diferentes variables tomadas de resúmenes por medición para 117 parcelas de <i>Leucaena leucocephala</i> utilizadas.   | 43 |
| No. 16. | Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <i>Leucaena leucocephala</i> en América Central.   | 44 |
| No. 17. | Tablas de rendimiento de <i>Leucaena leucocephala</i> para índices de sitio de 7, 9 y 11, y para densidades de plantación de 2500 y 4444 árboles por hectárea.  | 47 |
| No. 18. | Resultados de la verificación del modelo con las parcelas utilizadas para construir el modelo (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).   | 49 |
| No. 19. | Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 15 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).   | 49 |



## INDICE DE FIGURAS

|         |  |    |
|---------|--|----|
| No. 1.  | Diagrama del flujo de información para el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento.  | 6  |
| No. 2   | Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en América Central.  | 16 |
| No. 3.  | Curvas de índice para <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en América Central.  | 19 |
| No. 4.  | Desarrollo en Dap de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para los índices de sitio de 10, 14 y 18 m en América Central.  | 19 |
| No. 5.  | Producción en volúmen (con corteza para un diámetro mínimo de 5 cm) de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para los índices de sitio de 10, 14 y 18 m y densidades de plantación de 1111, 1600 y 2500 árboles por hectárea en América Central. | 20 |
| No. 6.  | Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en volumen de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para un índice de sitio de 14 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.                                     | 20 |
| No. 7.  | Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de <i>Gilricidia sepium</i> en América Central.   | 26 |
| No. 8.  | Curvas de índice de sitio para <i>Gilricidia sepium</i> en América Central.  | 30 |
| No. 9.  | Desarrollo en área basal por hectárea de <i>Gilricidia sepium</i> para los índices de sitio de 3, 5 y 7 m en América Central.  | 30 |
| No. 10. | Producción en peso seco de leña (PSL) de <i>Gilricidia sepium</i> para los índices de sitio de 3, 5 y 7 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea en América Central.  | 31 |
| No. 11. | Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en PSL de <i>Gilricidia sepium</i> para un índice de sitio de 5 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.   | 31 |
| No. 12. | Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de <i>Guazuma ulmifolia</i> en América Central.   | 34 |
| No. 13. | Curvas de índice para <i>Guazuma ulmifolia</i> en América Central.   | 38 |
| No. 14. | Desarrollo en Dap de <i>Guazuma ulmifolia</i> para los índices de sitio de 4, 6 y 8 m en América Central.  | 38 |
| No. 15. | Producción de peso seco de leña de <i>Guazuma ulmifolia</i> para los índices de sitio 4, 6 y 8 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea en América Central.   | 39 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| No. 16. | Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en peso seco de leña de <i>Guazuma ulmifolia</i> , para un índice de sitio de 6 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea. | 39 |
| No. 17. | Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de <i>Leucaena leucocephala</i> en América Central.   | 42 |
| No. 18. | Curvas de índice de sitio para <i>Leucaena leucocephala</i> en América Central.  | 45 |
| No. 19. | Desarrollo en Dap de <i>Leucaena leucocephala</i> para los índices de sitio de 7, 9 y 11 m, para densidades de plantación de 6400, 4444 y 2500 árboles por hectárea, respectivamente, en América Central.  | 45 |
| No. 20. | Producción en peso seco de leña (PSL) de <i>Leucaena leucocephala</i> para los índices de sitio de 7, 9 y 11 m y densidades de plantación de 2500, 4444 y 6400 árboles por hectárea en América Central     | 46 |
| No. 21. | Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en PSL de <i>Leucaena leucocephala</i> para un índice de sitio de 9 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.             | 46 |
| No. 22. | El incremento medio anual (IMA) en peso seco de leña para <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (EC), <i>Gliciridia sepium</i> (GS), <i>Guazuma ulmifolia</i> (GU) y <i>Leucaena leucocephala</i> (LL).          | 52 |

## RESUMEN

### MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE *Eucalyptus camaldulensis*, *Gilricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* EN AMÉRICA CENTRAL

Con base en los datos del Sistema de Manejo de Información sobre Recursos Arbóreo (MIRA) que contiene información de la red de parcelas permanentes de crecimiento instaladas en todos los países de la región centroamericana del Proyecto "Cultivo de Árboles de Uso Múltiple" (CATIE/ROCAP), fueron desarrollados modelos matemáticos para predecir el crecimiento y rendimiento de cuatro especies de árboles de uso múltiple y de crecimiento rápido: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Gilricidia sepium* (Jacq.) Steud., *Guazuma ulmifolia* Lamb. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Los modelos fueron desarrollados para predecir el volumen total (en m<sup>3</sup>/ha) o la biomasa seca de leña (t/ha) de plantaciones puras, sin intervenciones. Para estimar el índice de sitio se aplicó el método de la curva guía con la regresión jerárquica y la ecuación de Schumacher. La ecuación seleccionada para estimar el diámetro fue una variación de la ecuación de Von Bertalanffy (Chapman-Richards) que incluye el índice de sitio y la densidad de plantación. Esta serie de ecuaciones forma el modelo global para cada una de las cuatro especies, el cual fue incorporado en una hoja electrónica para facilitar la confección de las tablas de rendimiento.

**David A. Hughell**

**Especialista en Información Forestal,  
Proyecto Cultivo de Árboles de Uso  
Múltiple. CATIE. Turrialba, Costa Rica.**

## INTRODUCCION

En los últimos años en América Central y Panamá ha habido una mayor concientización por la necesidad de plantar árboles, lo cual ha ayudado a despertar el interés de donantes y agencias internacionales para financiar un mayor número de proyectos forestales. Sin embargo, existen también muchos ejemplos de fracasos, debido especialmente a la falta de información adecuada y oportuna, para tomar decisiones en la selección de especies de acuerdo con características de sitios y, por otra parte, a la falta de modelos de crecimiento y rendimiento que permitan predecir la producción, en términos de volumen o biomasa a través del tiempo y bajo condiciones diferentes de manejo.

Los modelos de crecimiento y rendimiento son unas herramientas eficientes para transformar los datos empíricos y los conocimientos silviculturales en información clave para realizar análisis financieros y programar el manejo de las plantaciones forestales. En el caso de especies de árboles de uso múltiple (AUM) estos modelos son algo más complejos debido a que el crecimiento y manejo no necesariamente concuerdan con los lineamientos tradicionales forestales. En algunos casos, estas especies de AUM forman más de un solo eje principal y tiene una alta capacidad de rebrotar. El productor está interesado en diferentes tipos de productos con diferentes dimensiones (madera, pulpa, postes, leña, etc) y en combinar los AUM en diferentes sistemas agroforestales.

En el caso de América Central existe una gran cantidad de información de mediciones de plantaciones forestales provenientes de una red de parcelas permanentes de crecimiento instaladas en toda la Región por los Proyectos "Leña y Fuentes Alternas de Energía" (1980-1986) y "Cultivo de Árboles de Uso Múltiple" (1986-1991) de CATIE-ROCAP en colaboración con las instituciones forestales de los países de la Región.

El Proyecto Madeleña, a través de un largo proceso de selección, ha definido y concentrado su esfuerzo de investigación en un grupo de 14 especies como prioritarias. Las especies han sido seleccionadas por su adaptación a clima y suelos de la Región, su rápido crecimiento y por brindar una diversidad de bienes y servicios, y su aptitud de considerarse en combinaciones agroforestales en las fincas de los pequeños agricultores de la Región.

De las especies prioritarias, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Gilricidia sepium* (Jacq.) Steud., *Guazuma ulmifolia* Lamb. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. han recibido particular atención y se cuenta con suficiente información disponible.

En el presente trabajo, se utiliza la información colectada por estos proyectos para desarrollar modelos regionales de rendimiento en términos de volumen y biomasa para esas especies establecidas en plantaciones puras y sin intervenciones en la forma de aclareos. Se espera que en el futuro y con información adicional de mediciones de edades superiores, estos modelos sean complementados y ajustados para predecir otros tipos de productos bajo condiciones diferentes de manejo y de sitio, así como, la inclusión de variables ambientales que permitan un mejor ajuste de los modelos.

## METODOLOGIA

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo matemático para convertir, resumir o generalizar los datos empíricos de crecimiento en ecuaciones matemáticas, de tal manera que permitan predecir el crecimiento y rendimiento en otros sitios donde no hay datos disponibles.

Gracias a las características comunes de crecimiento (crecimiento rápido y turnos cortos para la producción de biomasa) se aplicó la misma metodología para el desarrollo de los modelos de las cuatro especies en estudio. Los modelos son empíricos, es decir ajustados a datos reales, y determinantes, con una base biológica. Todos los modelos consisten en una serie de ecuaciones que estiman los diferentes parámetros del rodal (densidad, Dap, altura, biomasa).

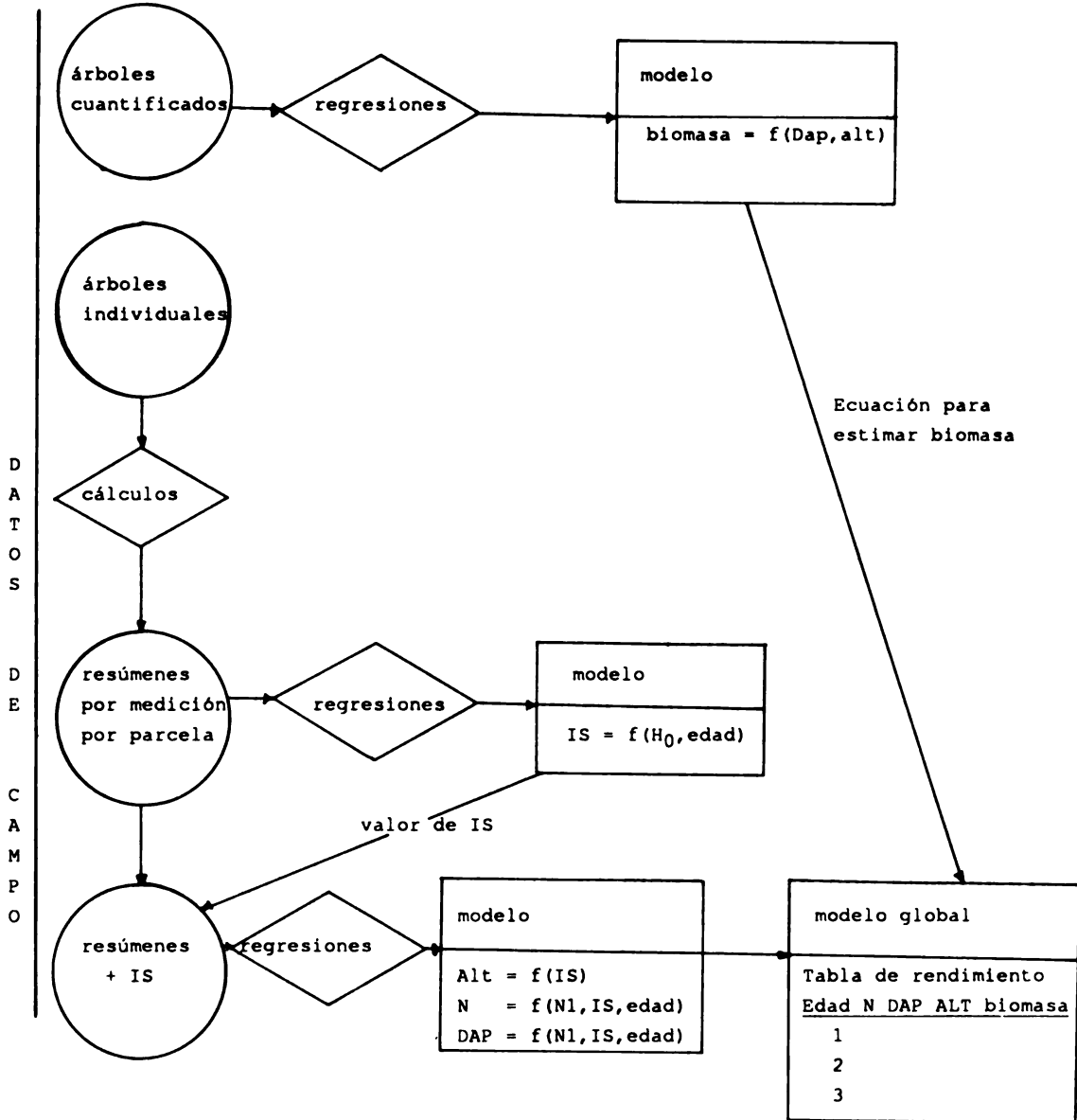
El término **modelo** puede referirse a cada ecuación o a la unión de una serie de ecuaciones a un **modelo global**. A continuación se describen los pasos para construir el modelo global:

- (1) Organizar y depurar la información en resúmenes por medición
- (2) Desarrollar una ecuación para estimar el índice de sitio con base en la edad y la altura dominantes
- (3) Desarrollar una ecuación para estimar la densidad actual con base en la densidad de plantación
- (4) Desarrollar una ecuación para estimar la altura media con base en la edad e índice de sitio
- (5) Desarrollar una ecuación para estimar el diámetro con base en la edad, índice de sitio y densidad de plantación
- (6) Desarrollar una ecuación para estimar la producción en términos de volumen o biomasa seca, con base en la altura y el diámetro
- (7) Incorporar la serie de ecuaciones al modelo global, de tal manera que permita confeccionar tablas de rendimiento en biomasa o volumen por hectárea
- (8) Verificar y validar el modelo global

Como resultado de los pasos 2 al 6 se obtiene una serie de ecuaciones matemáticas, que se usan en el paso 7 como base para formar el modelo global, utilizando la hoja electrónica Lotus 123. El resultado final es una herramienta que permite confeccionar tablas de rendimiento con diferentes índices de sitio y densidades de plantación.

La Figura 1 resume el diagrama de flujo de información de la metodología desarrollada en este estudio. En dicha Figura, los círculos corresponden a datos, los paralelogramos son actividades como cálculos y, los rectángulos corresponden a ecuaciones desarrolladas.

A continuación se presenta una breve descripción para cada paso de la metodología y, en el Capítulo siguiente se presentan los modelos de predicción de crecimiento y rendimiento para cada una de las cuatro especies.



dap = diámetro altura de pecho  
alt = altura  
IS = índice de sitio  
Ninicial = número de árboles plantados por hectárea  
Nactual = número de árboles actuales por hectárea

Figura 1. Diagrama del flujo de información para el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento.

## 1. Organización de la Información en resúmenes por medición

La unidad de información básica para desarrollar los modelos son resúmenes por medición y por parcela, los cuales han sido generados con los datos de mediciones de árboles individuales por el Sistema MIRA (Manejo de Información sobre Recursos Arbóreos) del Proyecto Madeleña. En el Cuadro 1 se describen las variables de resúmenes utilizadas.

Cuadro 1. Descripción de las variables de resúmenes, por medición y parcela utilizadas en el desarrollo de modelos de predicción del crecimiento y rendimiento.

---

|                      |  |
|----------------------|--|
| ID                   | identificación única de la parcela*                                      |
| Edad                 | edad de la medición (meses)  |
| N <sub>inicial</sub> | número de árboles plantados por hectárea o densidad de plantación (n/ha) |
| N <sub>actual</sub>  | número de árboles actuales por hectárea (n/ha)                           |
| g                    | área basal por árbol (cm <sup>2</sup> /árbol)                            |
| H                    | altura promedio del árbol (m)  |
| H <sub>d</sub>       | altura dominante (m)   |
| D <sub>cm</sub>      | Dap cuadrático medio (Dg o diámetro geométrico) <b>por árbol</b> (cm)    |
|                      | $D_{cm} = \sqrt{\frac{\sum d_{apeje}^2}{n_{\text{árbol}}}} \quad (1)$    |
| G                    | área basal por hectárea (m <sup>2</sup> /ha)                             |

---

\*/ ID = código de país + código de experimento + las dos últimas cifras del número serial de la parcela asignada

Se utiliza el término **eje** para cada bifurcación o rebrote del árbol que nace bajo la altura del pecho (1.3 m). En el caso de árboles con varios ejes, la **altura promedio del árbol** (H) es el promedio por parcela de las alturas del eje más alto de cada árbol.

Para tener un parámetro de crecimiento diamétrico de comparación entre las parcelas que tienen diferentes números de ejes por cada árbol se utiliza el **diámetro cuadrático medio** por árbol (D<sub>cm</sub> en Ecuación 1). El D<sub>cm</sub> es el



diámetro que corresponde al árbol promedio en área basal. Para resúmenes de árboles con solo un eje el Dcm es igual que el diámetro geométrico (Dg en Ecuación 2) tradicionalmente usado para representar el parámetro diámetro medio de una parcela.

$$Dg = \sqrt{\frac{\sum dap_{\text{árbol}}^2}{n_{\text{árbol}}}} \quad (2)$$

El Dg y el Dcm tiene la ventaja sobre el diámetro aritmético (Ecuación 3) por tener una relación exacta el el área basal.

$$Dap \text{ aritmética} = \frac{\sum dap_{\text{árbol}}}{n_{\text{árbol}}} \quad (3)$$

En este estudio se utiliza el término "dap" para las especies con un promedio igual o muy cercano a un eje para cada árbol (*Eucalyptus camaldulensis*, *Guazuma uimifolia* y *Leucaena leucocephala*). En el caso *Gilricidia sepium* (una especie con un promedio de más de 3 ejes por árbol) se utilizó en el modelo el área basal por árbol en vez del dap.

Con las especies que el número de parcelas lo permite (*Eucalyptus camaldulensis*, *Gilricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*), se separa una muestra aleatoria de 5 a 10 % de las parcelas, para ser utilizada en la validación del modelo.

Después de generar el archivo de resúmenes de cada medición por parcela, es necesario graficar (con Lotus 123) los datos de cada variable contra la edad, para evaluar la cobertura de los diferentes parámetros del rodal, y para identificar las inconsistencias en los datos (parcelas con un crecimiento negativo, nulo o muy diferente de la norma descrita por las otras parcelas). Durante este proceso de depuración de los datos originales se eliminan parcelas, mediciones y variables dentro de mediciones de acuerdo con las inconsistencias encontradas y la cobertura de la muestra. Por ejemplo, se pueden eliminar las mediciones con menos de 12 meses de edad, las parcelas sin mediciones mayores de 36 meses, parcelas con condiciones sobre representadas en la muestra y parcelas bajo condiciones extremas no bien representadas en la muestra.

La meta es llegar a una muestra de datos que tenga una representación balanceada y consistente de todas las condiciones en las que se pretende predecir con el modelo. Cabe mencionar que es mejor tener una muestra pequeña de datos de buena calidad y con un comportamiento lógico y real, que una muestra grande de datos poco consistentes.

Para cada especie se resume en un cuadro los ámbitos de las diferentes variables utilizadas para construir el modelo. Este cuadro indica al usuario del modelo las limitaciones del mismo, en términos de edad, densidad de plantación y el índice de sitio para su aplicación. El modelo pierde validez si se aplica fuera de estos ámbitos.

## 2. Estimación del índice de sitio

El primer componente dentro de cada modelo de crecimiento debe ser una estadística que represente el potencial de la especie por crecer en diferentes sitios. Dicha estadística es utilizada como variable independiente en las ecuaciones para estimar el diámetro, altura y densidad actual.

Como norma, dicha estadística es el **índice de sitio**, ~~el cual se define como la altura dominante que tiene o tendría un rodal a una edad base.~~ Tradicionalmente, se define la **altura dominante** como la altura promedio de los cien árboles más grandes por hectárea (Alder, 1980). Sin embargo, como en el presente caso, la mayoría de las parcelas que han sido evaluadas son de alrededor de un centésimo de hectárea y, por lo tanto el cálculo de altura dominante con base en un número de árboles proporcional al área de la parcela resultaría en la utilización de solamente el árbol más alto en la parcela. Se considera que no es confiable basar el índice de sitio en solamente un árbol, por lo que se rechazó el uso de esta altura dominante. Asimismo, se consideró y rechazó el uso de la altura media por ser un parámetro del rodal muy influido por la densidad y las intervenciones. Se decidió utilizar una nueva variable, el promedio de la altura de los tres árboles más altos por parcela. Se considera que esta variable se acerca suficientemente a la altura dominante para ser utilizada como tal.

La selección de la edad base debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- que sea suficientemente grande como para permitir distinguir diferentes índices de sitio con una precisión aceptable
- que se ubique hacia el final del turno de la especie
- que esté bien representada con las observaciones de campo
- que se conforme, en lo posible, con las edades bases utilizadas en otros estudios en la literatura

Para llegar a una ecuación que estime el índice de sitio (IS) con base en la edad y altura dominante se aplicó el método de la "curva guía" con la ecuación Schumacher (Alder, 1980).

### **Ecuación Schumacher:**

$$\ln(\text{altura}) = a + b/\text{edad}^k \quad (4)$$

Donde a, b y k son coeficientes estimados por la regresión.

El primer paso es estimar el valor de los coeficientes a, b y k mediante una regresión. En este estudio en vez de una regresión simple se utilizó la **regresión jerárquica**, para obtener un ajuste mejor a datos de parcelas con mediciones de varias edades.

Después se aplica el método de la **curva guía** para describir una familia de curvas de diferentes índices de sitio. Según este método existen dos modelos para describir la familia de curvas de índice de sitio: el modelo **a) común** y el

modelo b) común, los cuales describen familias de curvas polimórficas y anamórficas, respectivamente. Ambos modelos permiten estimar el índice de sitio (IS) con base en una altura dominante (Hd) dada (ecuaciones 5 y 7), o estimar la altura dominante con base en un índice de sitio dado (ecuaciones 6 y 8).

a) común

$$\ln(\text{IS}) = a + \frac{\text{edad}^k}{(\text{edad base})^k} * (\ln(\text{Hd}) - a) \quad (5)$$

$$\ln(\text{Hd}) = a + \frac{(\text{edad base})^k}{\text{edad}^k} * (\ln(\text{IS}) - a) \quad (6)$$

b) común

$$\ln(\text{IS}) = \ln(\text{Hd}) + b * \left( \frac{1}{(\text{edad base})^k} - \frac{1}{\text{edad}^k} \right) \quad (7)$$

$$\ln(\text{Hd}) = \ln(\text{IS}) + b * \left( \frac{1}{\text{edad}^k} - \frac{1}{(\text{edad base})^k} \right) \quad (8)$$

La selección del modelo está basada en la suposición de que el índice de sitio es una característica del sitio y de la especie, y que no cambia con la edad de la parcela. Por lo tanto, se puede comparar la diferencia entre los valores de índice de sitio calculados por la medición, contra los calculados por la parcela (con la edad más cercana a la edad base) para ambos modelos (aplicando las ecuaciones 5 y 7). El modelo seleccionado sería el que presenta la diferencia absoluta menor entre los dos índices de sitio calculados.

La ecuación para estimar el índice de sitio con base en la altura dominante y la edad es conocida como la estimación "indirecta" del índice de sitio. Al contrario, la estimación "directa" del índice de sitio es con base en los factores ambientales (por ejemplo precipitación, profundidad del suelo). En este documento no se contempla el desarrollo de ecuaciones para la estimación "directa", ya que sería objetivo de otros estudios.

### 3. Estimación de la densidad actual

El paso siguiente del modelo global es la ecuación para estimar la **densidad actual** ( $N_{\text{actual}}$ ) o sea el número de arboles actual (densidad actual) con base en la edad, **densidad Inicial** ( $N_{\text{inicial}}$ ), u otra variable disponible que tenga una buena correlación con la densidad actual ( $N_{\text{actual}}$ ):

$$N_{\text{actual}} = f(N_{\text{inicial}}, \text{IS}, \text{edad} \dots) \quad (9)$$

donde:

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| IS =                   | índice de sitio               |
| $N_{\text{inicial}}$ = | densidad inicial (árboles/ha) |
| $N_{\text{actual}}$ =  | densidad actual (árboles/ha)  |

De todas las ecuaciones desarrolladas para la construcción del modelo la densidad actual es la más difícil de ajustar, ya que normalmente la mortalidad es causada por una combinación de factores que no se pueden predecir con mucha exactitud; por ejemplo plagas, enfermedades, sequía y mantenimiento. Si la plantación no experimenta uno de estos factores es muy probable que la mortalidad sea casi nula.

Una excepción de lo mencionado es cuando la densidad ha alcanzado a niveles en que la plantación está experimentando auto-raleo. Sin embargo, con las cuatro especies del estudio no se observó esta condición de auto-raleo, y a la edad y densidad evaluadas.

Desechando la existencia de auto-raleo, consideramos que con un buen manejo la mortalidad es muy poca, la cual ocurre principalmente durante el primer año. Por lo tanto, para este componente del modelo global, se aplica en el primer año la supervivencia promedio de las parcelas analizadas:

$$N_{\text{primer año}} = a * N_{\text{inicial}} \quad (10)$$

Donde: "a" es el promedio de supervivencia

#### 4. Estimación de la altura media

Para estimar la **altura media** (H) con base en la edad y el índice de sitio (IS), se utilizó una de las variantes de la ecuación de Schumacher:

$$\ln(H) = a + b/\text{Edad} + c * \ln(\text{IS}) \quad (11)$$

Donde: a y b son coeficientes estimados por regresión

Dicha ecuación está basada en principios biológicos (Schumacher, 1939), ha sido utilizada en otros modelos de crecimiento (Clutter et. al., 1983) y presenta un buen ajuste de los datos de las cuatro especies estudiadas.

## 5. Estimación del diámetro

Después de evaluar diferentes ecuaciones para describir el crecimiento en diámetro y área basal, se seleccionó una variante del **modelo de Von Bertalanffy** (Chapman-Richards) para estimar el diámetro (Dcm o Dap). También la ecuación seleccionada está basada en principios biológicos y ha recibido una aceptación muy amplia en la investigación forestal (Clutter et. al., 1983; Pienaar et. al., 1974).

La forma más sencilla de la ecuación Von Bertalanffy es:

$$Dap = a * (1 - \text{Exp}(-b * \text{Edad}))^c \quad (12)$$

Donde:

Dap es el diámetro cuadrático medio por árbol

$$\text{EXP}(x) = e^x$$

$$e = 2,7183$$

**a, b y c** son coeficientes estimados por una regresión no lineal

Con base en la Ecuación 12 se aplicó la modificación descrita por Harrison y Daniels (1986), para incorporar el índice de sitio y la densidad en la estimación de los tres coeficientes **a, b y c** en la siguiente manera:

$$a = a1 * IS \quad (13)$$

$$b = b1 * (\text{densidad})^{b2} \quad (14)$$

$$c = c1 * IS^{c2} \quad (15)$$

Donde: IS = índice de sitio

**a1, b1, b2, c1 y c2** son los nuevos coeficientes estimados por regresión no lineal.

Para el factor de "densidad" (Ecuación 14) se utilizó el **espacio disponible** para cada árbol en m<sup>2</sup>:

$$\text{espacio disponible} = 10000/N_{\text{inicial}} \quad (16)$$

Con el índice de sitio y la densidad incorporados, la ecuación final es la siguiente:

$$Dap = a1 * IS * (1 - \text{EXP}(-b1 * (10000/N)^{b2} * \text{edad})) * (c1 * IS^{c2}) \quad (17)$$

Donde:

**a1, b1, b2, c1 y c2** son coeficientes estimados por regresión no lineal

Las partes correspondientes a las ecuaciones 13, 14 y 15 de la Ecuación 17 que no contribuyeron al ajuste de los datos fueron eliminadas para obtener una ecuación más simple. Por ejemplo, en el caso de que la densidad de plantación no mejora la estimación del Dcm de la muestra, este componente fue eliminado resultando una ecuación más simple (Ecuación 18).

$$Dap = a1*IS*(1-EXP(-b1*edad) (c1*IS^c2) \quad (18)$$

## 6. Ecuación para estimar la producción

Hasta aquí se han desarrollado ecuaciones para estimar el diámetro, altura y la densidad actual con base en la edad e índice de sitio. Para convertir este modelo de crecimiento en uno de rendimiento, hay que incluir una función para estimar la producción con base en el diámetro y la altura. La producción puede ser en peso seco de leña (ton/ha) o volumen (m<sup>3</sup>/ha). Las funciones para estimar la producción fueron desarrolladas con base en datos de árboles cuantificados individualmente.

Después de probar varias ecuaciones se seleccionó la ecuación logarítmica (Ecuación 19), por ser la que mejor se ajusta a los datos de las cuatro especies, y es una ecuación que ayuda a evitar problemas de heterogeneidad de varianza.

$$\ln(Y) = a + b*\ln(dap) + c*\ln(h) \quad (19)$$

Donde:

Y = la producción en biomasa o volumen

Dap = el diámetro a la altura del pecho o, en el caso de varios ejes, la raíz cuadrada de la suma de los diámetros cuadrados de los ejes

h = altura del árbol o, en el caso de varios ejes, la altura del eje más alto

## 7. Incorporación de la serie de ecuaciones al modelo global

El último paso en la metodología para construir el modelo para la predicción de crecimiento y rendimiento es incorporar todas estas ecuaciones al modelo global, de tal manera que permita confeccionar tablas de rendimiento para diferentes sitios y regímenes de manejo. Para esto se diseñó una hoja electrónica (con el paquete de computación "Lotus 123") que contiene las ecuaciones, las condiciones iniciales (índice de sitio y densidad) y la tabla de rendimiento correspondiente a estas condiciones. Esta hoja electrónica permite al usuario seleccionar las condiciones iniciales y recalcular una nueva tabla de acuerdo con estas condiciones.

## 8. Verificación y validación del modelo

En el área de modelaje se define la **verificación** como una comprobación del modelo con los mismos datos que fueron utilizados para construir el modelo; y se define **validación** como una comprobación del modelo con un grupo de datos independientes (Bruce y Wensel, 1987).

Cualquiera que sea, verificación o validación, esta comprobación consiste en una comparación entre los valores calculados por el modelo (a veces referidos como los valores predichos o esperados), y los valores observados para cada medición. Para realizar las evaluaciones se diseñó una hoja electrónica con "Lotus 123", la cual para cada medición estima con el modelo los parámetros del rodal  $N_{actual}$ ,  $d_{ap}$ ,  $H$  y producción (volumen o biomasa) y calcula la diferencia entre este valor calculado y el valor observado (valor real). Las estadísticas presentadas que resumen la evaluación son el número de mediciones analizadas, el promedio de las diferencias, la desviación estándar de las diferencias, y el coeficiente de variación (cv) con base en el valor medio observado (Ecuación 20).

$$cv = \frac{\text{desviación estándar de la diferencia}}{\text{promedio del observado}} \quad (20)$$

El promedio de las diferencias indica si existe un sesgo (una tendencia para sub o sobre estimar los valores observados) en los valores calculados con el modelo. Con una muestra representativa esta estadística casi siempre es cero o muy cerca a cero por la matemática de las regresiones de mínimos cuadrados utilizados para construir el modelo.

La desviación estándar representa la dispersión o precisión de las predicciones de las parcelas individuales alrededor del promedio. Por ejemplo, una desviación estándar de 1 cm en  $D_{cm}$  indica que 66% de las predicciones en  $D_{cm}$  están dentro de un centímetro del valor real. El cv representa la misma precisión o dispersión, pero en relación con el promedio de los valores observados. Este valor es útil para comparar la precisión de predecir entre diferentes parámetros del modelo o para comparar diferentes modelos.

Para cada especie se presenta una validación con la excepción de *Guazuma uimifolia*, en la cual se presenta una verificación por falta de suficientes datos para la validación.

Es importante notar que para las tres especies en las que se realizó la validación, la muestra aleatoria de parcelas seleccionadas para la validación no era completamente independiente de la muestra utilizada en la construcción del modelo. Esto debido a que la mayoría de las parcelas de crecimiento son tratamientos y repeticiones de ensayos formales, muchas de las parcelas en la validación son de los mismos ensayos que las parcelas en la muestra para construir el modelo.

## MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

La presentación de los modelos de predicción para cada especie incluye una discusión del modelo y los siguientes Cuadros y Figuras:

- una descripción de los ámbitos de los datos utilizados para desarrollar el modelo
- la serie de ecuaciones que forman el modelo
- gráficos de algunos componentes del modelo
- tablas de rendimiento para diferentes índices de sitio y densidades de plantación
- resumen de la verificación o la validación

### ***Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.**

***Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.** es una especie nativa de Australia que ha recibido una amplia aceptación en programas de plantación en las partes áridas y semiáridas de la Región. La especie crece bien en una gran variedad de climas y en suelos relativamente pobres. En América Central se le ha plantado en sitios con temperaturas medias entre 20 y 29°C, con precipitaciones entre 620 y 2900 mm anuales (hasta ocho meses con déficit hídrico) y con altitudes desde el nivel del mar hasta 1200 m. Además de producir leña de buena calidad la especie se utiliza para la producción de postes y madera para aserrío (CATIE, 1986).

En la Región normalmente la especie se planta en bloques puros, en líneas o asociada con cultivos. El uso primario es abastecer de madera a pequeñas industrias forestales, producción de postes y leña. En plantaciones, la especie se maneja con un turno estimado de 10 años y se recomienda un raleo a los cinco años para la producción de postes y madera para aserrío. También, se pueden manejar los rebrotes para la producción de leña con un turno de tres años (CATIE, 1989).

### **1. Manejo de los datos de crecimiento**

Para desarrollar el modelo para ***Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.** se empezó con un grupo de 487 parcelas permanentes (1113 mediciones) tomadas del Sistema MIRA, de las cuales se separó una muestra de 19 parcelas para realizar posteriormente la validación. La localización de los 165 sitios de trabajo del grupo original de parcelas se muestra en la Figura 2.

Se realizó una depuración de los datos, y se eliminaron las mediciones de menos de un año de edad, las parcelas con menos de 3 años de edad y las mediciones con inconsistencias, tales como un crecimiento nulo o negativo.



Para uniformizar los datos, y eliminar los casos extremos y poco representativos, también se eliminaron 25 parcelas con una supervivencia menor de 75% y 12 parcelas con una densidad de plantación mayor de 4600 árboles por hectárea. El resultado de la depuración fue un grupo de datos de 117 parcelas (357 mediciones) con el que se inició el proceso para desarrollar las ecuaciones del modelo.

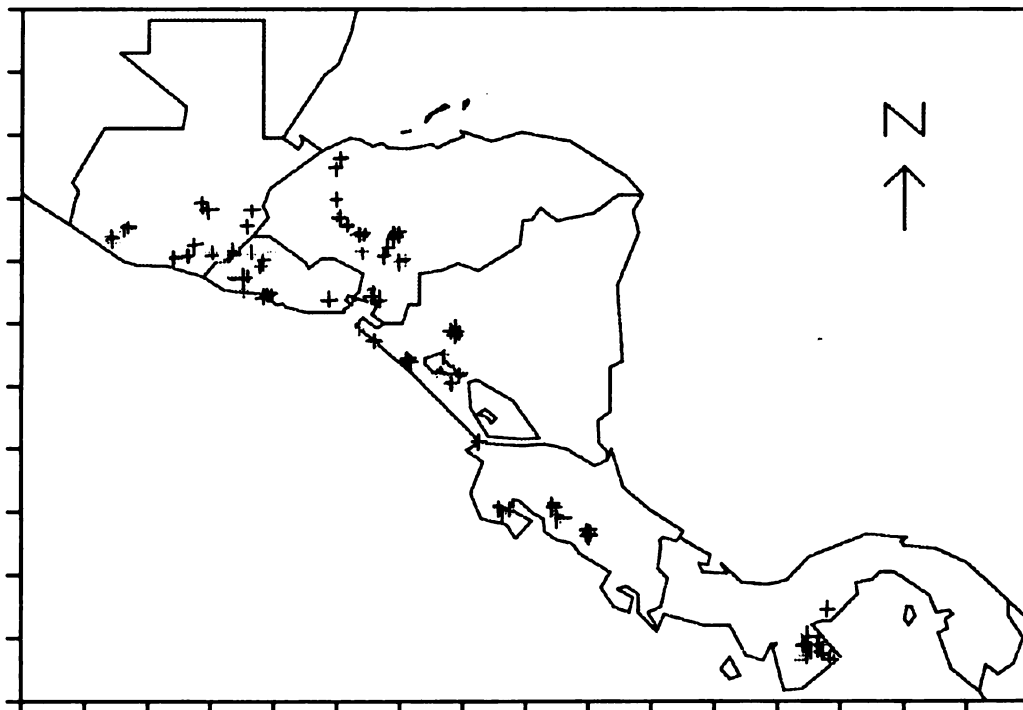


Figura 2: Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de *Eucalyptus camaldulensis* en América Central.

El Cuadro 2 presenta los ámbitos de las variables del archivo de datos ya depurados. Cabe mencionar que el uso del modelo para predecir el crecimiento y rendimiento debe limitarse a estos ámbitos mostrados en el Cuadro 2. Para densidades de plantación ( $N_{actual}$ ) mayores de 2800 árboles por hectárea, el modelo solamente se aplica a edades menores de 5 años, debido a que solamente estas edades están representadas con estas densidades en las parcelas utilizadas en este estudio. Además, para estas densidades, se recomienda la realización de un raleo entre los 3 y 5 años para la producción de madera a para pequeñas industrias y postes. El modelo no contempla raleos por la falta de datos de crecimiento.

**Cuadro 2. Ambitos de las variables incluidas para resúmenes por medición para 117 parcelas de *Eucalyptus camaldulensis* utilizadas .**

| Variable                    | Promedio | Ambito |        |
|-----------------------------|----------|--------|--------|
|                             |          | Mínimo | Máximo |
| Edad (meses)                | 38       | 12     | 141    |
| N <sub>inicial</sub> (n/ha) | 2520     | 833    | 6250   |
| N <sub>actual</sub> (n/ha)  | 2229     | 700    | 5750   |
| Neje (n/ha)                 | 5600     | 2307   | 725    |
| S <sub>Vivencia</sub> (%)   | 89       | 79     | 100    |
| D <sub>ap</sub> (cm)        | 6,1      | 1,3    | 16,2   |
| H (m)                       | 7,0      | 1,8    | 16,9   |
| H <sub>d</sub> (m)          | 10,1     | 2,9    | 25,0   |
| IS                          | 13,9     | 8,4    | 19,5   |

\* La descripción de las variables están en el Cuadro 1.

## 2. Modelo de predicción

El Cuadro 3 muestra la serie de ecuaciones que comprende el modelo global. La ecuación para estimar el índice de sitio fue desarrollada por Campos (1989a) con base en 100 parcelas (366 mediciones) del Proyecto Madeleña (Figura 3). Aplicando el método de la curva guía, él seleccionó el modelo de "a) común" con una edad base de 60 meses.

Como en el análisis de regresión no lineal para estimar el D<sub>ap</sub>, la densidad de plantación (N<sub>inicial</sub>) no fue significativo y, por esta razón, fue eliminado de la ecuación. Esto indica que a las densidades y edad estudiadas, la densidad no limita significativamente el crecimiento diamétrico.

Para estimar el número de árboles por hectárea actual (N<sub>actual</sub>) se aplicó la mortalidad promedio basada en el primer año.

En términos de producción se utilizó la ecuación para estimar el volumen con corteza hasta un diámetro mínimo de 5 cm desarrollada por Ugalde y Otárola (1981) con base en 61 árboles con D<sub>ap</sub> entre 5 y 20 cm en cuatro sitios en Nicaragua. En la ecuación para estimar la biomasa de leña, se utilizó la ecuación desarrollado por Ehrlich (1986) con base en una muestra de 21 árboles entre 2 y 20 cm de dap.

**Cuadro 3. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis* en América Central.**

Estimación de índice de sitio (IS) en m: Modelo "a) común" (Campos, 1989a)

$$\begin{aligned} \ln(\text{IS}) &= a + (\text{Edad}^k / \text{Edad base}^k) * (\ln(\text{Hd}) - a) & (21) \checkmark \\ a &= 4,0125 \\ k &= 0,3648 \\ \text{Edad base} &= 60 \text{ meses} \\ R^2 &= 75 \% \end{aligned}$$

Estimación de número de árboles por hectárea ( $N_{\text{actual}}$ )

$$\begin{aligned} N_{\text{actual}} &= a * N_{\text{inicial}} & (22) \\ a &= 0,885 \end{aligned}$$

Estimación de la altura media (H) en m

$$\begin{aligned} \ln(H) &= a + b/\text{edad} + c * \ln(\text{IS}) & (23) \checkmark \\ a &= -0,313 & (0,1552) * \\ b &= -20,277 & (0,5800) \\ c &= 1,095 & (0,0583) \\ R^2 &= 83 \% \end{aligned}$$

Estimación del Dap en cm

$$\begin{aligned} \text{Dap} &= c1 * \text{IS} * (1 - \text{EXP}(-c2 * \text{Edad})) (c3 * \text{IS} \wedge c4) & (24) \checkmark \\ c1 &= 1,0114 & (0,5427) \\ c2 &= 0,0143 & (0,00236) \\ c3 &= 1,4639 & (0,3058) \\ c4 &= -0,1844 & (0,0690) \\ R^2 &= 87 \% \\ n &= 362 \end{aligned}$$

Estimación de volumen con corteza hasta un diámetro mínimo de 5 centímetros en m<sup>3</sup>/árbol (Ugalde y Otárola, 1981)

$$\begin{aligned} \ln(\text{PSL}) &= a + b * \ln(\text{Dap}) + c * \ln(H) & (25) \\ a &= -9,31 \\ b &= 1,965 \\ c &= 0,69 \\ R^2 &= 99 \% \end{aligned}$$

Estimación del peso seco de leña (PSL) en kg/árbol (Ehrlich, 1986)

$$\begin{aligned} \ln(\text{PSL}) &= a * (\text{área basal del árbol}) & (26) \\ a &= 0,238 \\ R^2 &= 98 \% \end{aligned}$$

\*/ El valor en paréntesis es el error estándar del coeficiente.

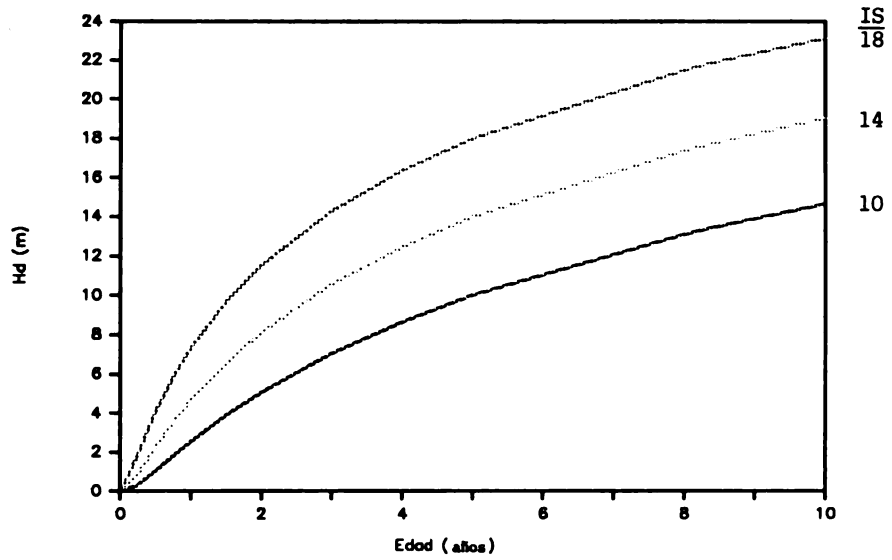


Figura 3. Curvas de índice para *Eucalyptus camaldulensis* en América Central.

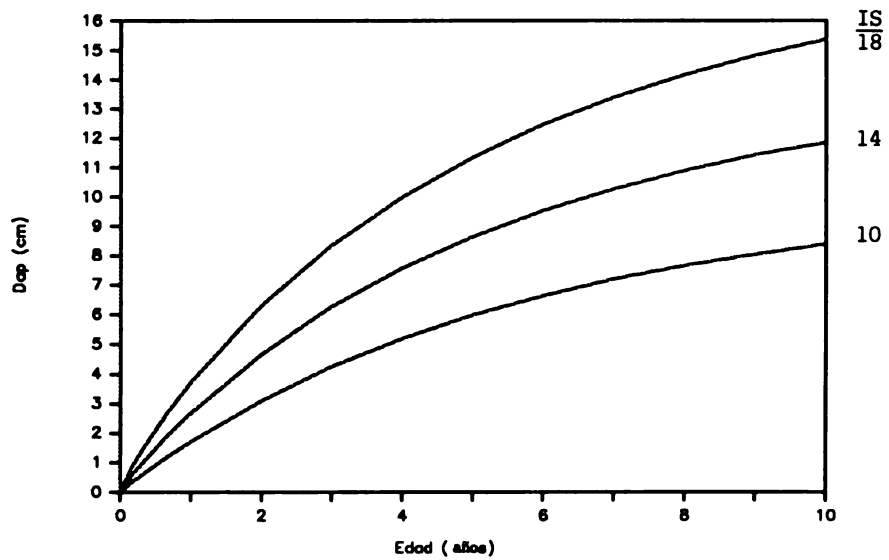


Figura 4. Desarrollo en Dap de *Eucalyptus camaldulensis* para los índices de sitio de 10, 14 y 18 m en América Central.

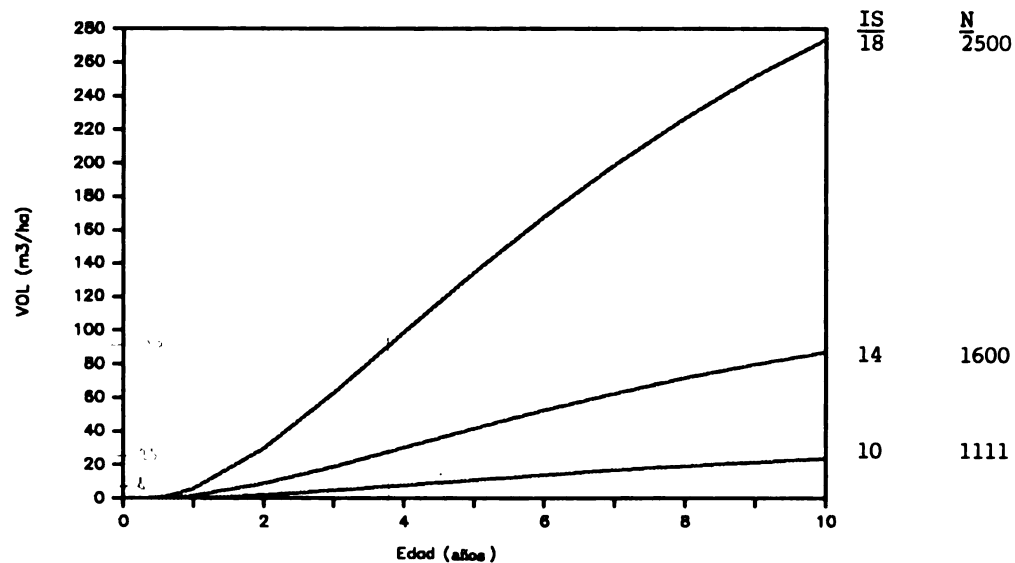


Figura 5. Producción en volúmen (con corteza para un diámetro mínimo de 5 cm) de *Eucalyptus camaldulensis* para los índices de sitio de 10, 14 y 18m y densidades de plantación de 1111, 1600 y 2500 árboles por hectárea en América Central.

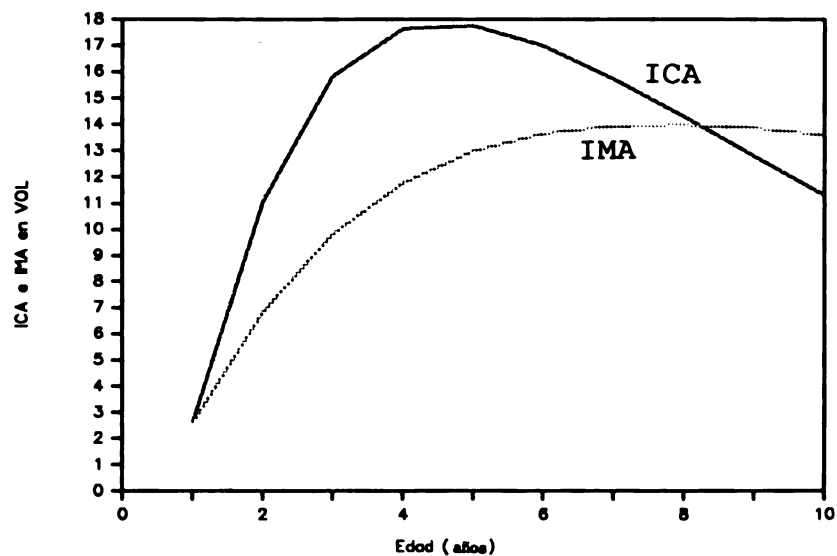


Figura 6. Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en volúmen de *Eucalyptus camaldulensis* para un índice de sitio de 14 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.

Las Figuras 4 y 5 presentan el comportamiento de Dap y volumen con corteza, respectivamente, con densidades de plantación e índices de sitio seleccionados para demostrar los ámbitos de estos parámetros. Los incrementos graficados en la Figura 6 demuestra que bajo condiciones medias, el turno para la producción de madera en tamaños pequeños es entre 7 y 9 años de edad.

En el Cuadro 4 se presentan las tablas de rendimiento para los índices de sitio 10, 14 y 18 m y las densidades de plantación de 1111, 2500, 1600 y 4444.

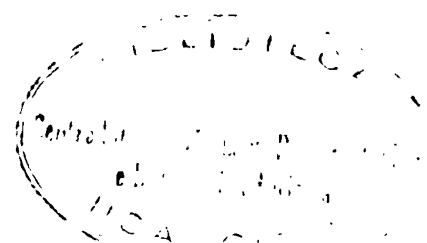
Cuadro 4. Tablas de rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis* para índices de sitio de 10, 14 y 18, y para densidades iniciales de 1111, 1600, 2500 árboles por hectárea.

IS = 10. N\_inicial = 1111

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 983      | 1,7      | 1,7   | 0,2                    | 0,4                      | 0,4                      | 0,4 |
| 2           | 983      | 3,1      | 3,9   | 0,7                    | 2,1                      | 1,7                      | 1,1 |
| 3           | 983      | 4,2      | 5,2   | 1,4                    | 4,7                      | 2,6                      | 1,6 |
| 4           | 983      | 5,2      | 6,0   | 2,1                    | 7,7                      | 3,0                      | 1,9 |
| 5           | 983      | 6,0      | 6,5   | 2,8                    | 10,8                     | 3,1                      | 2,2 |
| 6           | 983      | 6,6      | 6,9   | 3,4                    | 13,9                     | 3,0                      | 2,3 |
| 7           | 983      | 7,2      | 7,1   | 4,0                    | 16,7                     | 2,8                      | 2,4 |
| 8           | 983      | 7,7      | 7,4   | 4,5                    | 19,3                     | 2,6                      | 2,4 |
| 9           | 983      | 8,0      | 7,5   | 5,0                    | 21,6                     | 2,3                      | 2,4 |
| 10          | 983      | 8,4      | 7,7   | 5,4                    | 23,7                     | 2,1                      | 2,4 |

IS = 10 N\_inicial = 1600

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 1416     | 1,7      | 1,7   | 0,3                    | 0,5                      | 0,5                      | 0,5 |
| 2           | 1416     | 3,1      | 3,9   | 1,1                    | 3,0                      | 2,5                      | 1,5 |
| 3           | 1416     | 4,2      | 5,2   | 2,0                    | 6,8                      | 3,8                      | 2,3 |
| 4           | 1416     | 5,2      | 6,0   | 3,0                    | 11,2                     | 4,3                      | 2,8 |
| 5           | 1416     | 6,0      | 6,5   | 4,0                    | 15,6                     | 4,5                      | 3,1 |
| 6           | 1416     | 6,6      | 6,9   | 4,9                    | 20,0                     | 4,3                      | 3,3 |
| 7           | 1416     | 7,2      | 7,1   | 5,8                    | 24,0                     | 4,1                      | 3,4 |
| 8           | 1416     | 7,7      | 7,4   | 6,5                    | 27,7                     | 3,7                      | 3,5 |
| 9           | 1416     | 8,0      | 7,5   | 7,2                    | 31,1                     | 3,4                      | 3,5 |
| 10          | 1416     | 8,4      | 7,7   | 7,8                    | 34,1                     | 3,0                      | 3,4 |



**Cuadro 4. Continuación.**

IS = 10      N1 = 2500

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 2213     | 1,7      | 1,7   | 0,5                    | 0,8                      | 0,8                      | 0,8 |
| 2           | 2213     | 3,1      | 3,9   | 1,7                    | 4,8                      | 3,9                      | 2,4 |
| 3           | 2213     | 4,2      | 5,2   | 3,1                    | 10,6                     | 5,9                      | 3,5 |
| 4           | 2213     | 5,2      | 6,0   | 4,7                    | 17,4                     | 6,8                      | 4,4 |
| 5           | 2213     | 6,0      | 6,5   | 6,2                    | 24,4                     | 7,0                      | 4,9 |
| 6           | 2213     | 6,6      | 6,9   | 7,7                    | 31,2                     | 6,8                      | 5,2 |
| 7           | 2213     | 7,2      | 7,1   | 9,0                    | 37,5                     | 6,4                      | 5,4 |
| 8           | 2213     | 7,7      | 7,4   | 10,2                   | 43,3                     | 5,8                      | 5,4 |
| 9           | 2213     | 8,0      | 7,5   | 11,3                   | 48,6                     | 5,2                      | 5,4 |
| 10          | 2213     | 8,4      | 7,7   | 12,2                   | 53,2                     | 4,7                      | 5,3 |

IS = 10      N<sub>inicial</sub> = 4444

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 3933     | 1,7      | 1,7   | 0,9                    | 1,5                      | 1,5                      | 1,5 |
| 2           | 3933     | 3,1      | 3,9   | 3,0                    | 8,4                      | 7,0                      | 4,2 |
| 3           | 3933     | 4,2      | 5,2   | 5,6                    | 18,9                     | 10,5                     | 6,3 |
| 4           | 3933     | 5,2      | 6,0   | 8,3                    | 31,0                     | 12,0                     | 7,7 |
| 5           | 3933     | 6,0      | 6,5   | 11,0                   | 43,4                     | 12,4                     | 8,7 |

IS = 14      N<sub>inicial</sub> = 1111

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 983      | 2,7      | 2,4   | 0,6                    | 1,1                      | 1,1                      | 1,1 |
| 2           | 983      | 4,7      | 5,6   | 1,7                    | 6,1                      | 4,9                      | 3,0 |
| 3           | 983      | 6,3      | 7,5   | 3,0                    | 13,1                     | 7,0                      | 4,4 |
| 4           | 983      | 7,6      | 8,6   | 4,4                    | 20,9                     | 7,8                      | 5,2 |
| 5           | 983      | 8,6      | 9,4   | 5,8                    | 28,8                     | 7,9                      | 5,8 |
| 6           | 983      | 9,5      | 9,9   | 7,0                    | 36,4                     | 7,6                      | 6,1 |
| 7           | 983      | 10,3     | 10,3  | 8,2                    | 43,4                     | 7,0                      | 6,2 |
| 8           | 983      | 10,9     | 10,6  | 9,2                    | 49,7                     | 6,4                      | 6,2 |
| 9           | 983      | 11,4     | 10,9  | 10,1                   | 55,4                     | 5,7                      | 6,2 |
| 10          | 983      | 11,9     | 11,1  | 10,9                   | 60,4                     | 5,0                      | 6,0 |

**Cuadro 4. Continuación.**

IS = 14      N<sub>inicial</sub> = 1600

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 1           | 1416     | 2,7      | 2,4   | 0,8                    | 1,7                      | 1,7                      | 1,7 |
| 2           | 1416     | 4,7      | 5,6   | 2,4                    | 8,7                      | 7,1                      | 4,4 |
| 3           | 1416     | 6,3      | 7,5   | 4,4                    | 18,9                     | 10,1                     | 6,3 |
| 4           | 1416     | 7,6      | 8,6   | 6,4                    | 30,1                     | 11,3                     | 7,5 |
| 5           | 1416     | 8,6      | 9,4   | 8,3                    | 41,5                     | 11,4                     | 8,3 |
| 6           | 1416     | 9,5      | 9,9   | 10,1                   | 52,4                     | 10,9                     | 8,7 |
| 7           | 1416     | 10,3     | 10,3  | 11,7                   | 62,5                     | 10,1                     | 8,9 |
| 8           | 1416     | 10,9     | 10,6  | 13,2                   | 71,6                     | 9,1                      | 9,0 |
| 9           | 1416     | 11,4     | 10,9  | 14,5                   | 79,8                     | 8,2                      | 8,9 |
| 10          | 1416     | 11,9     | 11,1  | 15,6                   | 87,0                     | 7,2                      | 8,7 |

IS = 14      N<sub>inicial</sub> = 2500

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 1           | 2213     | 2,7      | 2,4   | 1,3                    | 2,6                      | 2,6                      | 2,6  |
| 2           | 2213     | 4,7      | 5,6   | 3,8                    | 13,6                     | 11,1                     | 6,8  |
| 3           | 2213     | 6,3      | 7,5   | 6,8                    | 29,5                     | 15,8                     | 9,8  |
| 4           | 2213     | 7,6      | 8,6   | 9,9                    | 47,1                     | 17,6                     | 11,8 |
| 5           | 2213     | 8,6      | 9,4   | 13,0                   | 64,9                     | 17,8                     | 13,0 |
| 6           | 2213     | 9,5      | 9,9   | 15,8                   | 81,9                     | 17,0                     | 13,6 |
| 7           | 2213     | 10,3     | 10,3  | 18,3                   | 97,6                     | 15,7                     | 13,9 |
| 8           | 2213     | 10,9     | 10,6  | 20,6                   | 111,9                    | 14,3                     | 14,0 |
| 9           | 2213     | 11,4     | 10,9  | 22,7                   | 124,7                    | 12,8                     | 13,9 |
| 10          | 2213     | 11,9     | 11,1  | 24,4                   | 136,0                    | 11,3                     | 13,6 |

IS = 14      N<sub>inicial</sub> = 4444

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 1           | 3933     | 2,7      | 2,4   | 2,2                    | 4,6                      | 4,6                      | 4,6  |
| 2           | 3933     | 4,7      | 5,6   | 6,7                    | 24,3                     | 19,7                     | 12,1 |
| 3           | 3933     | 6,3      | 7,5   | 12,1                   | 52,4                     | 28,1                     | 17,5 |
| 4           | 3933     | 7,6      | 8,6   | 17,6                   | 83,7                     | 31,3                     | 20,9 |
| 5           | 3933     | 8,6      | 9,4   | 23,0                   | 115,3                    | 31,6                     | 23,1 |



**Cuadro 4. Continuación.**IS = 18       $N_{inicial} = 1111$ 

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 1           | 983      | 3,7      | 3,2   | 1,1                    | 2,6                      | 2,6                      | 2,6  |
| 2           | 983      | 6,3      | 7,4   | 3,1                    | 13,3                     | 10,6                     | 6,6  |
| 3           | 983      | 8,3      | 9,9   | 5,4                    | 27,9                     | 14,6                     | 9,3  |
| 4           | 983      | 10,0     | 11,3  | 7,7                    | 43,8                     | 15,9                     | 11,0 |
| 5           | 983      | 11,4     | 12,3  | 10,0                   | 59,7                     | 15,8                     | 11,9 |
| 6           | 983      | 12,5     | 13,1  | 12,0                   | 74,7                     | 15,0                     | 12,4 |
| 7           | 983      | 13,4     | 13,6  | 13,9                   | 88,4                     | 13,8                     | 12,6 |
| 8           | 983      | 14,2     | 14,0  | 15,5                   | 100,8                    | 12,4                     | 12,6 |
| 9           | 983      | 14,8     | 14,3  | 17,0                   | 111,9                    | 11,0                     | 12,4 |
| 10          | 983      | 15,4     | 14,6  | 18,2                   | 121,6                    | 9,7                      | 12,2 |

IS = 18       $N_{inicial} = 1600$ 

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 1           | 1416     | 3,7      | 3,2   | 1,5                    | 3,8                      | 3,8                      | 3,8  |
| 2           | 1416     | 6,3      | 7,4   | 4,4                    | 19,1                     | 15,3                     | 9,5  |
| 3           | 1416     | 8,3      | 9,9   | 7,7                    | 40,2                     | 21,1                     | 13,4 |
| 4           | 1416     | 10,0     | 11,3  | 11,1                   | 63,1                     | 23,0                     | 15,8 |
| 5           | 1416     | 11,4     | 12,3  | 14,3                   | 85,9                     | 22,8                     | 17,2 |
| 6           | 1416     | 12,5     | 13,1  | 17,3                   | 107,5                    | 21,6                     | 17,9 |
| 7           | 1416     | 13,4     | 13,6  | 20,0                   | 127,3                    | 19,8                     | 18,2 |
| 8           | 1416     | 14,2     | 14,0  | 22,4                   | 145,2                    | 17,9                     | 18,2 |
| 9           | 1416     | 14,8     | 14,3  | 24,5                   | 161,1                    | 15,9                     | 17,9 |
| 10          | 1416     | 15,4     | 14,6  | 26,3                   | 175,2                    | 14,0                     | 17,5 |

IS = 18       $N_{inicial} = 2500$ 

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | Vol (m <sup>3</sup> /ha) | ICA (m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| 1           | 2213     | 3,7      | 3,2   | 2,4                    | 5,9                      | 5,9                      | 5,9  |
| 2           | 2213     | 6,3      | 7,4   | 6,9                    | 29,8                     | 23,9                     | 14,9 |
| 3           | 2213     | 8,3      | 9,9   | 12,1                   | 62,8                     | 32,9                     | 20,9 |
| 4           | 2213     | 10,0     | 11,3  | 17,4                   | 98,7                     | 35,9                     | 24,7 |
| 5           | 2213     | 11,4     | 12,3  | 22,4                   | 134,3                    | 35,6                     | 26,9 |
| 6           | 2213     | 12,5     | 13,1  | 27,0                   | 168,0                    | 33,7                     | 28,0 |
| 7           | 2213     | 13,4     | 13,6  | 31,2                   | 199,0                    | 31,0                     | 28,4 |
| 8           | 2213     | 14,2     | 14,0  | 34,9                   | 226,9                    | 27,9                     | 28,4 |
| 9           | 2213     | 14,8     | 14,3  | 38,2                   | 251,8                    | 24,9                     | 28,0 |
| 10          | 2213     | 15,4     | 14,6  | 41,1                   | 273,7                    | 21,9                     | 27,4 |

Cuadro 4. Continuación.

|                |             | IS = 18     | $N_{inicial} = 4444$ |                           |                             |                             |      |  |
|----------------|-------------|-------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|--|
| Edad<br>(años) | N<br>(N/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m)             | G<br>(m <sup>2</sup> /ha) | Vol<br>(m <sup>3</sup> /ha) | ICA<br>(m <sup>3</sup> /ha) | IMA  |  |
| 1              | 3933        | 3,7         | 3,2                  | 4,3                       | 10,6                        | 10,6                        | 10,6 |  |
| 2              | 3933        | 6,3         | 7,4                  | 12,3                      | 53,0                        | 42,5                        | 26,5 |  |
| 3              | 3933        | 8,3         | 9,9                  | 21,5                      | 111,6                       | 58,6                        | 37,2 |  |
| 4              | 3933        | 10,0        | 11,3                 | 30,9                      | 175,4                       | 63,8                        | 43,8 |  |
| 5              | 3933        | 11,4        | 12,3                 | 39,8                      | 238,7                       | 63,3                        | 47,7 |  |

### 3. Validación del modelo

El Cuadro 5 presenta los resultados de la validación, del modelo de predicción del crecimiento y rendimiento. Cabe mencionar que la validación se realizó con una muestra aleatoria e independiente de 19 parcelas. Las estadísticas en esta tabla corresponden a la diferencia entre el valor calculado (o predicho) con el modelo y el observado (valor real).

Los valores pequeños en los promedios de las diferencias demuestran que, en general, el modelo no sub-estima ni sobre-estima los valores reales. Además, la precisión para estimar el crecimiento de parcelas individuales es adecuada, ya que los coeficientes de variación (cv) de 13 a 20 % son bastante bajos. La poca precisión encontrada en la estimación del rendimiento en volumen (cv de 46% y 55%) es causada por el efecto complementario del desajuste para estimar los parámetros que se usan para calcular el volumen ( $N_{actual}$ , Dap y altura). Hay que tomar en cuenta este nivel de precisión en la aplicación del modelo para estimar el rendimiento en áreas específicas.

Cuadro 5. Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 19 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).

| Estadística          | Parámetros del crecimiento |             |          |                             |
|----------------------|----------------------------|-------------|----------|-----------------------------|
|                      | $N_{actual}$<br>(n/ha)     | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | Vol<br>(m <sup>3</sup> /ha) |
| Tamaño de la muestra | 44                         | 44          | 44       | 44                          |
| Promedio             | 30,1                       | 0,0         | -0,1     | 5,3                         |
| Desviación estándar  | 318,5                      | 1,24        | 1,01     | 22,68                       |
| cv* (%)              | 13,1                       | 20,4        | 15,0     | 55,0                        |

\*/ cv = coeficiente de variación = desviación estándar de la diferencia dividido por el valor medio del observado.

***Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.**

***Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.** es nativa de las zonas bajas del pacífico de México y América Central donde predomina una estación seca bien definida (hasta ocho meses). El árbol tiene un porte medio, fija el nitrógeno y produce leña y forraje de buena calidad (CATIE, 1986).

La especie es plantada principalmente en cercas vivas, pero también como sombra para el café y en plantaciones puras con turnos de aproximadamente cinco años (CATIE 1989). En bosques naturales se aprovecha para leña con turnos de 6 a 8 años (Ugaide y Otárola, 1981).

### 1. Manejo de los datos de crecimiento

Para desarrollar el modelo para ***Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.** se empezó con un grupo de 532 parcelas permanentes (1485 mediciones) tomadas del Sistema MIRA. La localización de los 68 sitios de trabajo está indicada en la Figura 7. De este grupo de datos se separó una muestra de 21 parcelas para realizar posteriormente la validación. En la depuración de los datos se eliminaron las mediciones de menos de un año, las parcelas que no contaban con mediciones de más de 3 años y las mediciones con inconsistencias, tales como un crecimiento nulo o negativo. Asimismo, para uniformar los datos se eliminaron 14 parcelas con una supervivencia menor de 60%.

Como resultado de la depuración quedó un grupo de datos de 128 parcelas (479 mediciones) para desarrollar las ecuaciones de predicción.

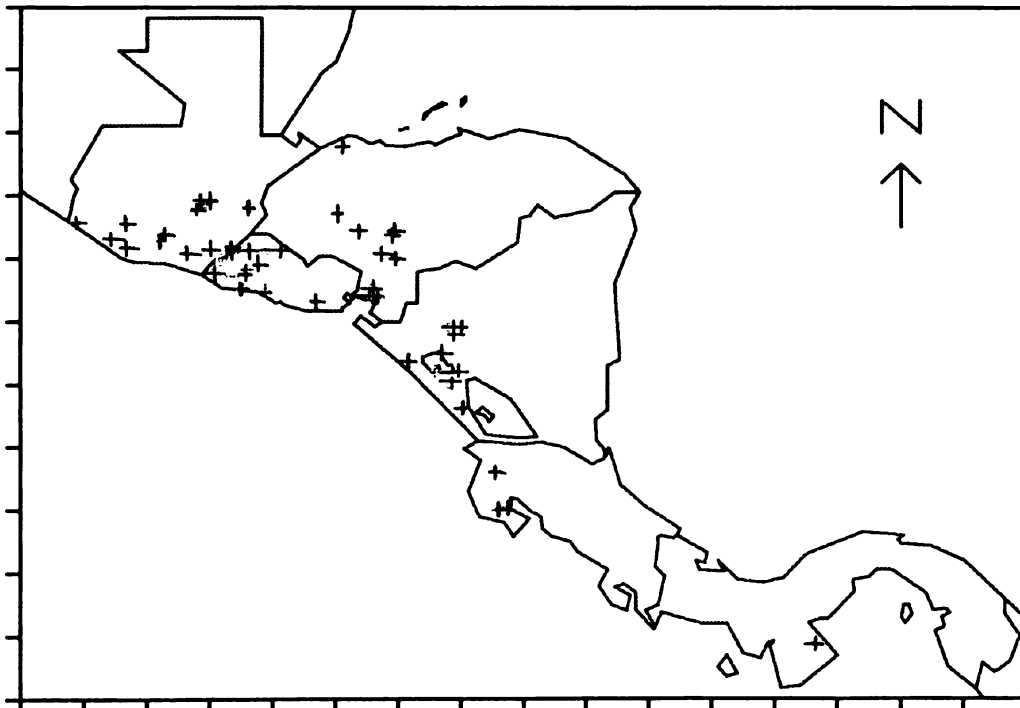


Figura 7. Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de ***Gliricidia sepium*** en América Central.

El Cuadro 6 presenta los ámbitos de las variables del archivo de datos ya depurados. Cabe mencionar que el uso del modelo para predecir el crecimiento y rendimiento debe limitarse a estos ámbitos mostrados en el Cuadro 1.

Es importante notar que los datos de *Gliricidia sepium* demuestran un promedio de más de 3 ejes por cada árbol (al contrario de las otras 3 especies que tienen un promedio cerca de uno). Como los modelos son a nivel de árbol, y no eje, se seleccionaron el parámetro "Dcm" (diámetro cuadrático medio) para representar el grosor de los árboles y la altura del eje más alto para representar la altura del árbol.

Cuadro 6. Ámbitos de las variables incluidas para resúmenes por medición para 128 parcelas de *Gliricidia sepium*.

| Variable                          | Promedio | Ambito |        |
|-----------------------------------|----------|--------|--------|
|                                   |          | Mínimo | Máximo |
| Edad (meses)                      | 33       | 12     | 74     |
| Ninicial (n/ha)                   | 2674     | 1111   | 5000   |
| Nactual (n/ha)                    | 2480     | 741    | 5000   |
| Neje (n/ha)                       | 7884     | 2716   | 31111  |
| S Vivencia (%)                    | 93       | 60     | 100    |
| $g^{**}$ (cm <sup>2</sup> /árbol) | 21,1     | 1,8    | 65,0   |
| $G^{***}$ (m <sup>2</sup> /ha)    | 0,45     | 5,65   | 17,59  |
| H (m)                             | 3,4      | 0,6    | 8,7    |
| Hd (m)                            | 4,2      | 0,9    | 10,2   |
| IS                                | 5,2      | 1,9    | 10,1   |

\* La descripción de las variables está en el Cuadro 1.

\*\* área basal por árbol

\*\*\* área basal por hectárea

## 2. Modelo de predicción

El Cuadro 7 muestra la serie de ecuaciones que comprende el modelo global. Para la estimación de índice de sitio se seleccionó el modelo "a) común" con una edad base de 48 meses. De acuerdo con este modelo la Figura 8 presenta las curvas de índice de sitio de 3, 5 y 7 metros, las cuales representan el índice medio de los sitios pobres, regulares y buenos, respectivamente.

Para estimar la altura con base en la edad y el índice de sitio, fue necesario ponderar los datos con la edad para corregir un problema de heterogeneidad de varianza.

Para estimar el número de árboles por hectárea actual ( $N_{actual}$ ) se aplicó la mortalidad promedio en el primer año.

Como *Gliricidia sepium* normalmente tiene varios ejes por árbol, se optó por desarrollar un modelo para estimar el área basal por hectárea (G) en vez del dap. La ecuación seleccionada (Ecuación 30) es una modificación de la ecuación de Von Bertalanffy (1957). No se detectó una influencia significativa de la densidad de plantación sobre el desarrollo en área basal.

La ecuación para estimar el peso seco de leña por árbol fue desarrollada con base en 86 árboles cuantificados de 3 ensayos realizados, en Costa Rica, Panamá y El Salvador (experimentos CR120L\*, PA049L y SV011L). Dichos árboles representan un ámbito diamétrico de de 2 a 20 cm. Es importante notar que por ser una ecuación para estimar la biomasa a nivel de árbol, y no eje, las variables independientes son el área basal por árbol (g) en cm<sup>2</sup> y la altura del eje más alto por árbol. Mediante el análisis de regresión se encontró que el componente de altura no fue significativo, por lo tanto, la altura no fue incluida en la ecuación seleccionada (Ecuación 31).

La Figura 9 presenta el comportamiento del G con los índices de sitio de 3, 5 y 7 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.

La Figura 10 presenta el crecimiento en peso seco de leña (PSL en toneladas por hectárea) con diferentes índices de sitio y densidades de plantación, y la Figura 11 los incrementos en PSL bajo condiciones medias.

En el Cuadro 8 se presenta las tablas para índices de sitio de 3, 5 y 9, y de la densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea. Se selecciona esta densidad de plantación por ser la que se recomienda para la producción de leña.

Cuadro 7. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de *Gliricidia sepium* en América Central.

---

Estimación de índice de sitio (IS) en m: Modelo "a) común"

$$\ln(\text{IS}) = a + (\text{Edad}^k / \text{Edad base}^k) * (\ln(\text{Hd}) - a) \quad (27)$$

a = 2,5055  
k = 0,4551  
Edad base = 48 meses  
R<sup>2</sup> = 80 %  
n = 477

Estimación de número de árboles por hectárea (N<sub>actual</sub>)

$$N_{\text{actual}} = a * N_{\text{inicial}} \quad (28)$$

a = 0,928

---

\*/ La identificación de los experimentos corresponde a los códigos utilizados en el Sistema MIRA del Proyecto Madeña/CATIE.

## Cuadro 7. Continuación.

### Estimación de la altura media (H) en m

$$\ln(H) = a + b/\text{Edad} + c \cdot \ln(\text{IS}) \quad (29) \checkmark$$

$$\begin{aligned} a &= 0,1671 & (0,0458)^* \\ b &= -14,684 & (0,4565) \\ c &= 0,9538 & (0,0259) \\ R^2 &= 85 \% \\ n &= 472 \end{aligned}$$

### Estimación del G en m<sup>2</sup>/ha

$$G = c1 * (1 - \text{EXP}(-c2 * \text{IS} * \text{Edad}))^{c3} \quad (30) \checkmark$$

$$\begin{aligned} c1 &= 12,349 & (1,318) \\ c2 &= 0,005948 & (0,00144) \\ c3 &= 2,0981 & (0,438) \\ R^2 &= 62 \% \\ n &= 310 \end{aligned}$$

### Estimación del peso seco de leña (PSL) en kg/árbol

$$\ln(\text{PSL}) = a + b \cdot \ln(g) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} a &= -1,229 & (0,183) \\ b &= 0,94 & (0,052) \\ R^2 &= 87 \% \\ n &= 86 \end{aligned}$$

Donde:  $g$  = área basal por árbol en cm<sup>2</sup>

---

\*/ El valor en paréntesis es el error estándar de la estimación del coeficiente.

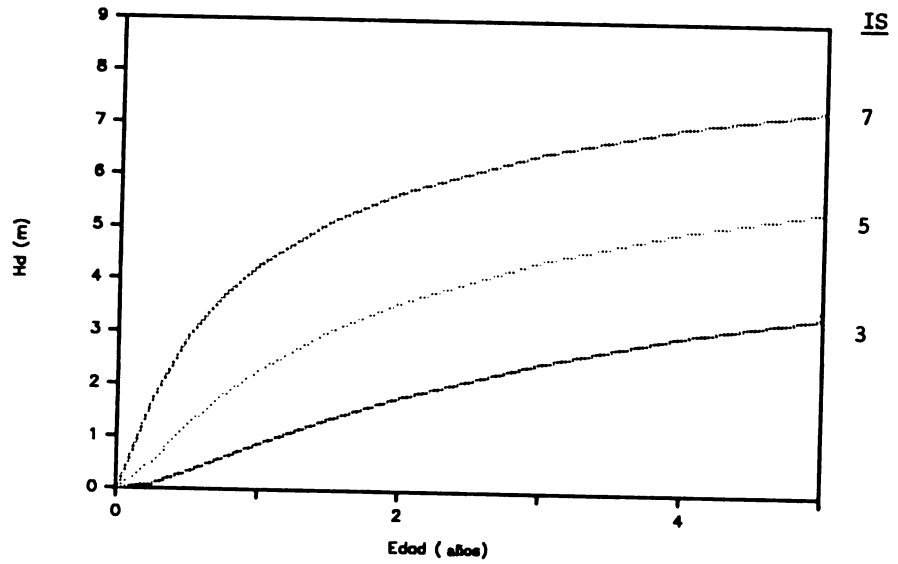


Figura 8. Curvas de índice de sitio para *Gliricidia sepium* en América Central.

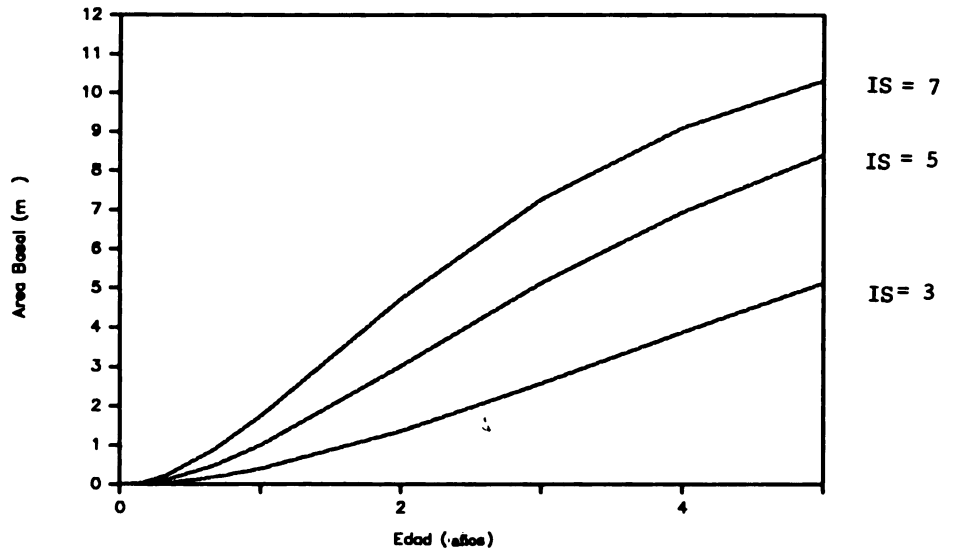


Figura 9. Desarrollo en área basal por hectárea de *Gliricidia sepium* para los índices de sitio de 3, 5 y 7 m en América Central.

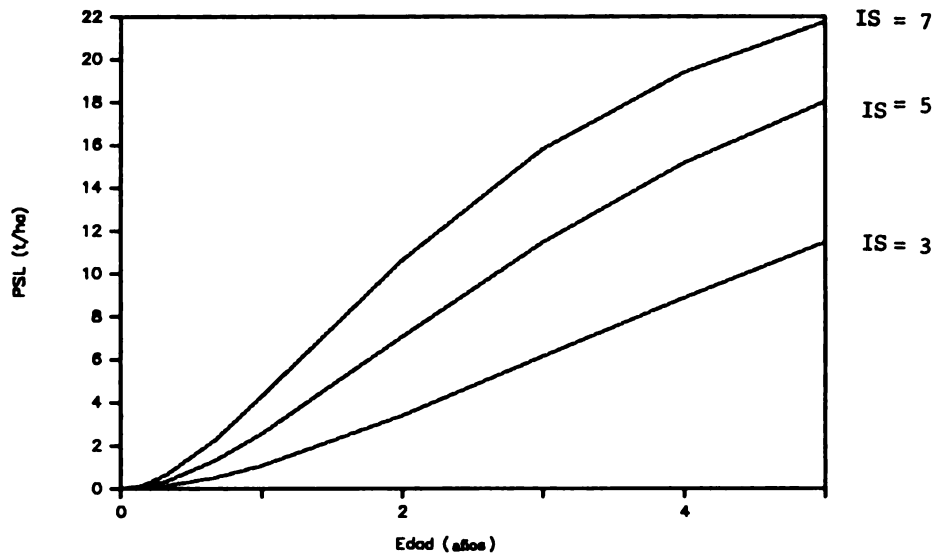


Figura 10. Producción en peso seco de leña (PSL) de *Gilricidia seplum* para los índices de sitio de 3, 5 y 7 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea en América Central.

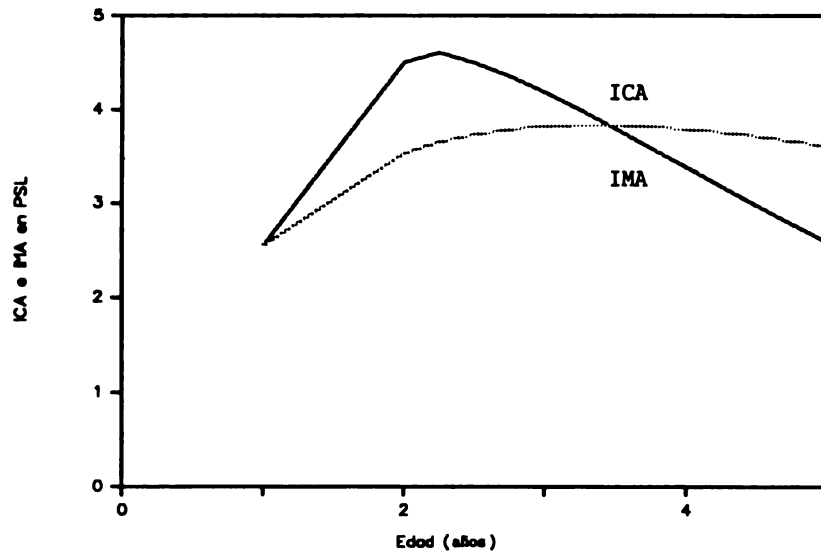


Figura 11. Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en PSL de *Gilricidia seplum* para un índice de sitio de 5 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.



Cuadro 8. Tablas de rendimiento de *Gilircidia seplum* para índices de sitio de 3, 5 y 7, y para una densidades de plantación de 2500 árboles por hectárea.

| IS = 3      N <sub>inicial</sub> = 2500 |          |                      |         |                        |            |            |            |
|---|----------|----------------------|---------|------------------------|------------|------------|------------|
| edad (años)                             | N (N/ha) | g (cm <sup>2</sup> ) | ALT (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
| 1                                       | 2320     | 1.7                  | 1.0     | 0.4                    | 1.09       | 1.1        | 1.1        |
| 2                                       | 2320     | 5.8                  | 1.8     | 1.4                    | 3.40       | 2.3        | 1.7        |
| 3                                       | 2320     | 11.1                 | 2.2     | 2.6                    | 6.13       | 2.7        | 2.0        |
| 4                                       | 2320     | 16.7                 | 2.5     | 3.9                    | 8.89       | 2.8        | 2.2        |
| 5                                       | 2320     | 22.1                 | 2.6     | 5.1                    | 11.48      | 2.6        | 2.3        |

| IS = 5      N <sub>inicial</sub> = 2500 |          |                      |         |                        |            |            |            |
|---|----------|----------------------|---------|------------------------|------------|------------|------------|
| edad (años)                             | N (N/ha) | g (cm <sup>2</sup> ) | ALT (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
| 1                                       | 2320     | 4.3                  | 1.6     | 1.0                    | 2.55       | 2.6        | 2.6        |
| 2                                       | 2320     | 13.0                 | 3.0     | 3.0                    | 7.06       | 4.5        | 3.5        |
| 3                                       | 2320     | 22.1                 | 3.6     | 5.1                    | 11.48      | 4.4        | 3.8        |
| 4                                       | 2320     | 29.9                 | 4.0     | 6.9                    | 15.17      | 3.7        | 3.8        |
| 5                                       | 2320     | 36.2                 | 4.3     | 8.4                    | 18.04      | 2.9        | 3.6        |

| IS = 7      N <sub>inicial</sub> = 2500 |          |                      |         |                        |            |            |            |
|---|----------|----------------------|---------|------------------------|------------|------------|------------|
| edad (años)                             | N (N/ha) | g (cm <sup>2</sup> ) | ALT (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
| 1                                       | 2320     | 7.5                  | 2.2     | 1.7                    | 4.29       | 4.3        | 4.3        |
| 2                                       | 2320     | 20.3                 | 4.1     | 4.7                    | 10.64      | 6.4        | 5.3        |
| 3                                       | 2320     | 31.3                 | 5.0     | 7.3                    | 15.81      | 5.2        | 5.3        |
| 4                                       | 2320     | 39.2                 | 5.6     | 9.1                    | 19.41      | 3.6        | 4.9        |
| 5                                       | 2320     | 44.5                 | 5.9     | 10.3                   | 21.77      | 2.4        | 4.4        |

### 3. Validación del modelo

Los Cuadros 3 y 4 presentan los resultados de la validación, del modelo de predicción del crecimiento y rendimiento la cual se realizó con una muestra de 21 parcelas. Las estadísticas en esta tabla corresponden a la diferencia entre el valor calculado (o predicho) con el modelo y el observado (valor real).

Los valores pequeños en los promedios de las diferencias demuestran que, en general, el modelo no sub-estima ni sobre-estima los valores reales. Además, la precisión para predecir el crecimiento y rendimiento de parcelas individuales es adecuada, ya que los coeficientes de variación (cv) de 15% para altura y 34% y 36% para área basal y PSL respectivamente, son bastante bajos.

Cuadro 9. Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 21 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).

| Estadística          | Parámetros del crecimiento    |                                |          |               |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|
|                      | $N_{\text{actual}}$<br>(n/ha) | $G^*$<br>(cm <sup>2</sup> /ha) | H<br>(m) | PSL<br>(t/ha) |
| Tamaño de la muestra | 66                            | 64                             | 65       | 63            |
| Promedio             | 58,6                          | 0,1                            | 0,1      | 0,3           |
| Desviación estándar  | 222,4                         | 1,79                           | 0,56     | 4,39          |
| cv (%)               | 10,1                          | 34,3                           | 14,7     | 35,5          |

\*/ área basal por hectárea

#### ***Guazuma ulmifolia* Lamb.**

***Guazuma ulmifolia* Lamb.** es un árbol de porte mediano con copa redonda que es nativo de América desde el sur de México hasta el norte de Argentina. En forma natural la especie se encuentra en las zonas bajas cálidas (temperatura media anual superior a 24 °C), con precipitaciones entre 700 y 1500 mm y desde el nivel del mar hasta 1200 msnm (Santander y Campos, 1988; CATIE, 1986).

El uso principal es para leña, pero también se utiliza para postes, varas para construcciones rurales, sombra para ganado, forraje y en programas de conservación de suelos. La regeneración de la especie es abundante en áreas abiertas y también tiene alta capacidad de rebrote (CATIE, 1986). Normalmente se encuentra en plantaciones puras o hileras, y se maneja con un turno aproximado de cuatro años para la producción de leña o como árboles individuales en potreros (CATIE 1989).

## 1. Manejo de los datos de crecimiento

Para desarrollar el modelo de predicción del crecimiento y rendimiento de *Guazuma ulmifolia* Lamb. se inició con un grupo de 74 parcelas permanentes de crecimiento (272 mediciones) grabado en el Sistema MIRA. Por el número pequeño de parcelas disponibles no se separó una sub-muestra de datos para realizar la validación. La localización de estas parcelas está presentada en la Figura 12.

La depuración de los datos consistió en eliminar las mediciones de menos de 12 meses, las parcelas que no contaban con más de 15 meses, las mediciones con una supervivencia menor de 75% y las mediciones que presentaba inconsistencias en el crecimiento. El resultado fue un grupo de datos de 37 parcelas (120 mediciones) para desarrollar las ecuaciones de predicción del modelo.

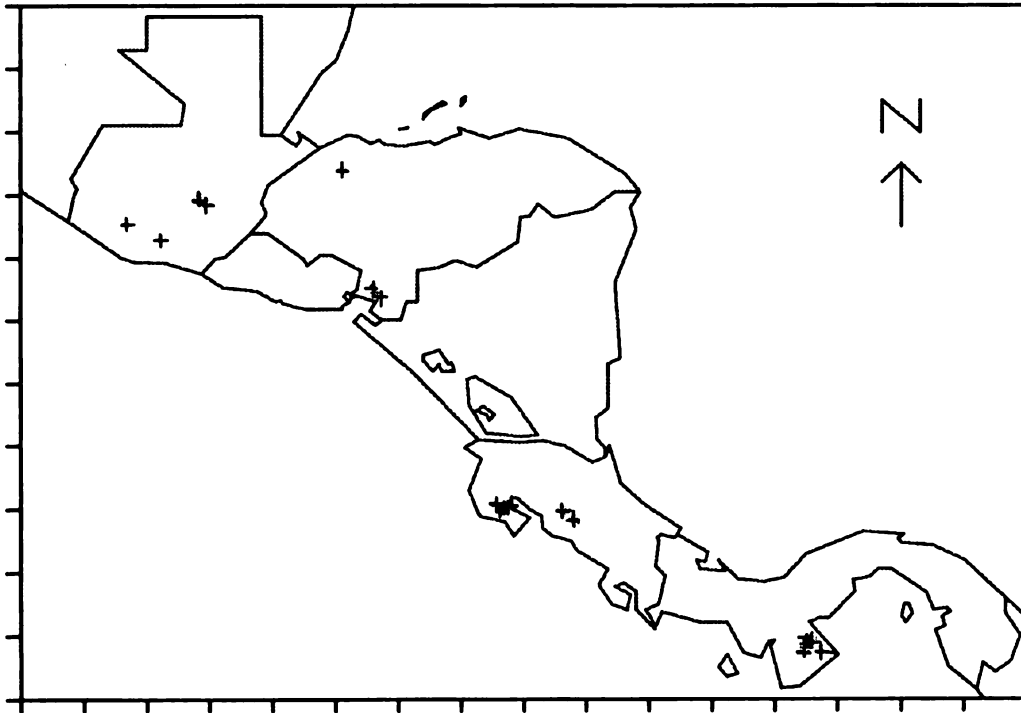


Figura 12. Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de *Guazuma ulmifolia* en América Central.

El Cuadro 10 presenta los ámbitos de las variables del archivo con los datos depurados. El uso del modelo para predecir el crecimiento y rendimiento debe limitarse a los ámbitos mostrados en este cuadro. Además, se debe limitar la aplicación a una sola densidad de plantación ( $N_{actual}$ ) de 2500 árboles por hectárea, ya que es la única densidad representada adecuadamente en la muestra, y es la densidad recomendada para el establecimiento de plantaciones para producción de leña.

**Cuadro 10. Ámbitos de las diferentes variables de resúmenes por medición para 37 parcelas de *Guazuma ulmifolia* utilizadas\*.**

| Variable                    | Promedio | Ambito |        |
|-----------------------------|----------|--------|--------|
|                             |          | Mínimo | Máximo |
| Edad (meses)                | 30       | 12     | 62     |
| N <sub>inicial</sub> (n/ha) | 2500     | 2500   | 2500   |
| N <sub>actual</sub> (n/ha)  | 2773     | 2500   | 4444   |
| Neje (n/ha)                 | 2987     | 1950   | 5300   |
| S_Vivencia (%)              | 95       | 78     | 100    |
| D <sub>ap</sub> (cm)        | 4,7      | 1,4    | 8,0    |
| H (m)                       | 3,2      | 0,7    | 7,8    |
| Hd (m)                      | 3,9      | 0,9    | 8,6    |
| IS                          | 5,5      | 2,4    | 8,5    |

\* La descripción de las variables están en el Cuadro 1.

## 2. Modelo de predicción

El Cuadro 11 muestra la serie de ecuaciones que comprende el modelo global de predicción. De acuerdo con la metodología descrita, se aplicó el método de la curva guía con la regresión jerárquica, y se seleccionó el modelo de "a) común". Se considera que un índice de sitio de 4 m representa un sitio pobre, 6 m representa un sitio regular y 8 m un sitio bueno a la edad base de 48 meses.

**Cuadro 11. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de *Guazuma uimifolia* en América Central.**

---

Estimación de índice de sitio (IS) en m: Modelo "a" común"

$$\ln(\text{IS}) = a + (\text{Edad}^k / \text{Edad base}^k) * [\ln(\text{Hd}) - a] \quad (32)$$

a = 4,337  
 b = -5,921  
 Edad base = 48 meses  
 R<sup>2</sup> = 89 %  
 n = 119

Estimación de número de árboles por hectárea (N<sub>actual</sub>)

$$N_{\text{actual}} = a * N_{\text{inicial}} \quad (33)$$

a = 0,956

Estimación de la altura media (H) en m

$$\ln(H) = a + b/\text{Edad} + c * \ln(\text{IS}) \quad (34)$$

a = -0,1835      (-0,102) \*  
 b = -14,382      (0,880)  
 c = 1,095      (0,0514)  
 R<sup>2</sup> = 88 %  
 n = 119

Estimación del Dap en cm

$$\text{DAP} = c1 * \text{IS} * (1 - \text{EXP}(-c2 * \text{Edad})) (c3 * \text{IS} \wedge c4) \quad (35)$$

c1 = 0,9380      (0,0598)  
 c2 = 0,06841      (0,0214)  
 c3 = 0,3738      (0,324)  
 c4 = 0,9486      (0,448)  
 R<sup>2</sup> = 81 %  
 n = 63

Estimación del peso seco de leña (PSL) en kg/árbol

$$\ln(\text{PSL}) = a + b * \ln(\text{Dap}) + c * \ln(h) \quad (36)$$

a = -1,9336  
 b = 1.430      (0,113)  
 c = 0.8177      (0,122)  
 R<sup>2</sup> = 83%  
 n = 173

---

\* El valor en paréntesis es el error estándar de la estimación del coeficiente.

Para estimar el número de árboles por hectárea actual ( $N_{\text{actual}}$ ) se aplicó la mortalidad promedio en el primer año.

Como solamente la densidad de plantación ( $N_{\text{inicial}}$ ) de 2500 árboles por hectárea está representada adecuadamente en los datos, la densidad no entró en el modelo para estimar el Dap.

Con base en datos de 173 árboles cuantificados de un ensayo en Honduras (HN081L\*) y 3 ensayos en Panamá (PA009L, PA020L y PA093L) fueron desarrolladas ecuaciones para estimar la biomasa de los componentes fuste, ramas, follaje, árbol total (fuste + ramas + follaje) y leña (fuste + ramas). La muestra de árboles cuantificados representan diámetros entre 1,5 hasta 8 cm, y alturas entre 1,5 hasta 8,5 m. Los resultados están presentados en Cuadro 12. Por ser una muestra de árboles de varios ensayos no se encontró coeficientes de determinación ( $R^2$ ) muy altos. Para el modelo de predicción el parámetro de producción fue representado con la ecuación para estimar el peso seco de leña (PSL).

Cuadro 12. Ecuaciones para estimar biomasa (en kg secos por árbol) de *Guazuma ulmifolia* con base en 173 árboles cuantificados.

Modelo:  $\ln(\text{biomasa}) = a + b \cdot \ln(\text{Dap}) + c \cdot \ln(h)$  (37)

| componente | a       | b      | c                  | $R^2$ (%)     |
|------------|---------|--------|--------------------|---------------|
| fuste      | -2,2331 | 1,4388 | 0,7979<br>(1,067)* | 83<br>(0,114) |
| ramas      | -2,5894 | 0,8865 | 0,8441<br>(0,232)  | 44<br>(0,225) |
| follaje    | -1,4981 | 1,0113 | 0,2513<br>(0,176)  | 38<br>(0,180) |
| total      | -1,1607 | 1,4651 | 0,4483<br>(0,118)  | 76<br>(0,126) |
| leña       | -1,9336 | 1,4300 | 0,8177<br>(0,113)  | 83<br>(0,122) |

\* El valor en paréntesis es el error estándar del coeficiente.

Las Figuras 13, 14 y 15 presentan el comportamiento de altura media, Dap y peso seco de leña (PSL), respectivamente, con índices de sitio seleccionados para demostrar los ámbitos de estos parámetros. La Figura 16 presenta los incrementos en peso seco de leña para plantaciones bajo condiciones medias.

El Cuadro 13 presenta tablas de rendimiento para *Guazuma ulmifolia* con índices de sitio de 4, 6 y 8 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.

\* Código de ensayo utilizado en el Sistema MIRA.

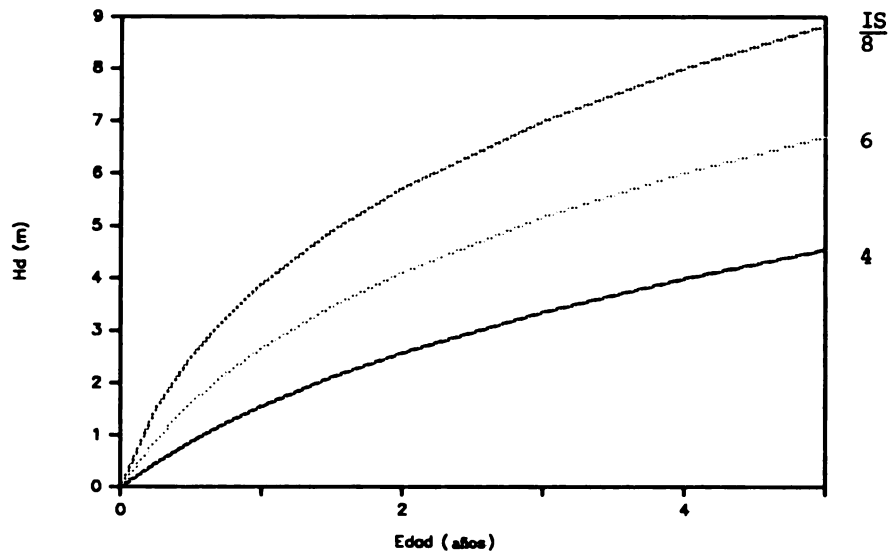


Figura 13. Curvas de índice para *Guazuma ulmifolia* en América Central.

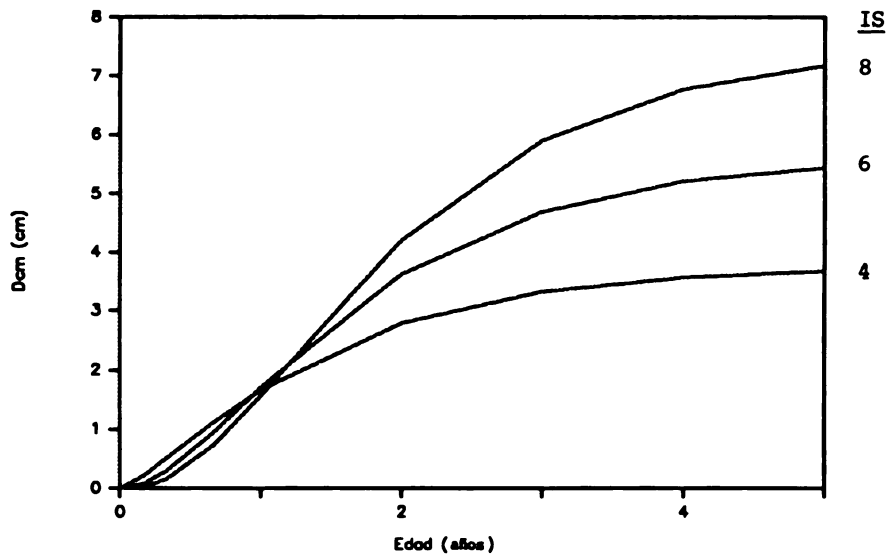


Figura 14. Desarrollo en Dap de *Guazuma ulmifolia* para los índices de sitio de 4, 6 y 8 m en América Central.

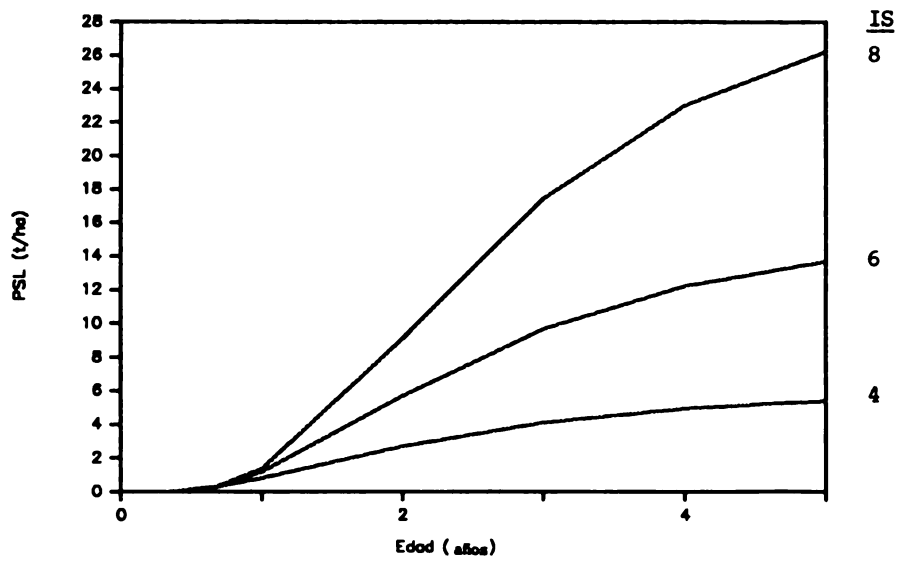


Figura 15. Producción de peso seco de leña de *Guazuma ulmifolia* para los índices de sitio 4, 6 y 8 m y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea en América Central.

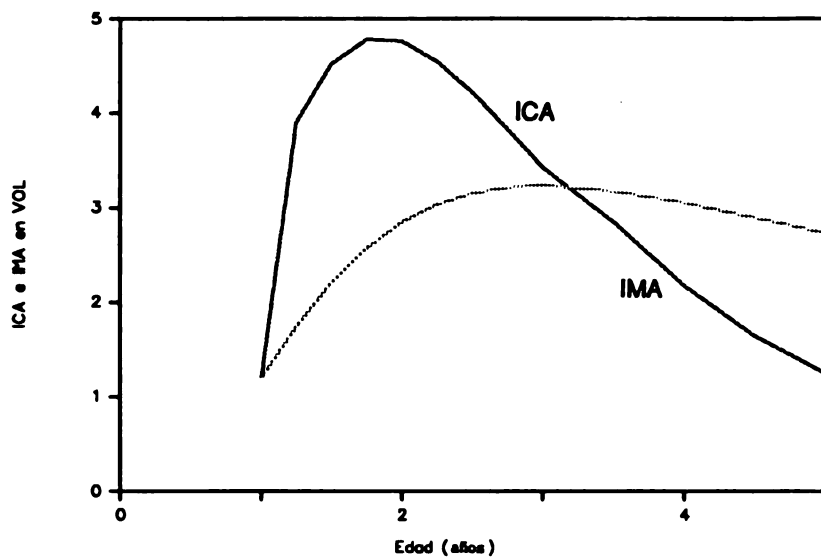


Figura 16. Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en peso seco de leña de *Guazuma ulmifolia*, para un índice de sitio de 6 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.



Cuadro 13: Tablas de rendimiento de *Guazuma ulmifolia* para índices de sitio de 4, 6 y 8 m y una densidad de plantación de 2500.

IS = 4      N1 = 2500

| Edad (años) | N (N/ha) | dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 2390     | 1,7      | 1,1   | 0,5                    | 0,8        | 0,8        | 0,8        |
| 2           | 2390     | 2,8      | 2,1   | 1,5                    | 2,7        | 1,9        | 1,4        |
| 3           | 2390     | 3,3      | 2,5   | 2,1                    | 4,1        | 1,4        | 1,4        |
| 4           | 2390     | 3,6      | 2,8   | 2,4                    | 4,9        | 0,8        | 1,2        |
| 5           | 2390     | 3,7      | 3,0   | 2,5                    | 5,4        | 0,5        | 1,1        |

IS = 6      N<sub>inicial</sub> = 2500

| Edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 2390     | 1,7      | 1,8   | 0,6                    | 1,2        | 1,2        | 1,2        |
| 2           | 2390     | 3,6      | 3,2   | 2,5                    | 5,7        | 4,5        | 2,9        |
| 3           | 2390     | 4,7      | 4,0   | 4,1                    | 9,7        | 4,0        | 3,2        |
| 4           | 2390     | 5,2      | 4,4   | 5,1                    | 12,2       | 2,5        | 2,7        |
| 5           | 2390     | 5,4      | 4,6   | 5,6                    | 13,7       | 1,5        | 2,7        |

IS = 8      N<sub>inicial</sub> = 2500

| Edad (años) | N (N/ha) | dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 2390     | 1,6      | 2,4   | 0,5                    | 1,4        | 1,4        | 1,4        |
| 2           | 2390     | 4,2      | 4,4   | 3,3                    | 9,1        | 7,7        | 4,6        |
| 3           | 2390     | 5,9      | 5,4   | 6,5                    | 17,4       | 8,3        | 5,8        |
| 4           | 2390     | 6,8      | 6,0   | 8,6                    | 23,0       | 5,6        | 5,8        |
| 5           | 2390     | 7,2      | 6,4   | 9,7                    | 26,2       | 3,2        | 5,3        |

### 3. Verificación

El Cuadro 14 presenta resultados de la verificación. La validación no se realizó por falta de una muestra suficientemente grande de parcelas de crecimiento. La verificación demuestra que el modelo se ajusta bien a los datos, en términos de no presentar sesgo y tener una precisión adecuada.

Cuadro 14: Resultados de la verificación del modelo de predicción para *Guazuma ulmifolia* con las parcelas utilizadas para construir un modelo (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).

| Estadística            | Parámetros del crecimiento    |             |          |               |
|------------------------|-------------------------------|-------------|----------|---------------|
|                        | N <sub>actual</sub><br>(n/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | PSL<br>(t/ha) |
| Tamaño de la muestra   | 114                           | 62          | 113      | 62            |
| Promedio               | 0,2                           | 0,0         | -0,1     | -0,53         |
| Desviación estándar    | 186,4                         | 0,69        | 0,58     | 3,33          |
| C.V./ <sup>*</sup> (%) | 7,0                           | 14,9        | 18,2     | 27,8          |

cv= coeficiente de variación = desviación estándar de la diferencia dividido por el valor medio del observado.

#### *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, es una leguminosa originaria de las tierras del interior de México que ha sido utilizada como forraje, leña, carbón, madera, fertilizante orgánico y alimento humano (CATIE 1986). En América Central se le ha plantado en sitios con temperaturas medias entre 22 y 29°C, con precipitaciones entre 880 a 2900 mm (4 a 9 meses de déficit hídrico) y desde el nivel del mar hasta 600 msnm (CATIE, 1986).

Se ha cultivado con buenos resultados en plantaciones puras, en líneas y asociada con cultivos. La especie puede reproducirse fácilmente por regeneración natural o rebrotes (CATIE 1986). En plantación el turno aproximado es alrededor de 5 años para la producción de leña (CATIE, 1989).

#### 1. Manejo de los datos de crecimiento

Para desarrollar el modelo para *Leucaena leucocephala* se empezó con un grupo de 744 parcelas permanentes (1982 mediciones) de *Leucaena leucocephala* variedad "K-8" tomadas del Sistema MIRA. La Figura 17 indica la localización de los 121 sitios de trabajo donde se encuentran estas parcelas. En

la depuración de los datos se eliminaron las mediciones de menos de un año, las parcelas que no contaban con 3 años de edad y las mediciones con inconsistencias, tales como un crecimiento nulo o negativo. Para uniformizar los datos, y eliminar los casos extremos y poco representativos, se eliminaron 21 parcelas con una supervivencia menor de 70%, 4 parcelas con una densidad de plantación mayor de 13000 árboles por hectárea y 14 parcelas con un promedio de ejes por árbol mayor de 1,8. El resultado de la depuración fue un grupo de datos de 163 parcelas (619 mediciones) para iniciar el proceso para desarrollar las ecuaciones del modelo.

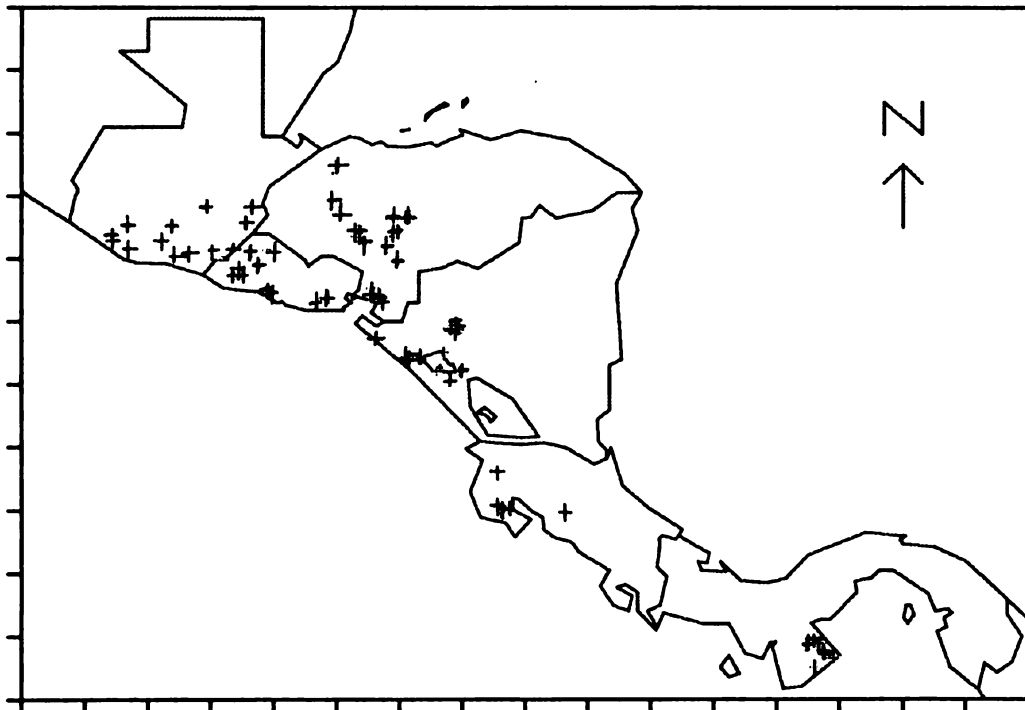


Figura 17. Sitios donde se encuentran las parcelas de crecimiento de *Leucaena leucocephala* en América Central.

El Cuadro 15 presenta los ámbitos de las variables del archivo de datos ya depurados. Cabe mencionar que el uso del modelo para predecir el crecimiento y rendimiento debe limitarse a estos ámbitos mostrados en el Cuadro 1.

Cuadro 15. Ambitos de las diferentes variables tomadas de resúmenes por medición, para 117 parcelas de *Leucaena leucocephala* utilizadas.

| Variable        | Promedio | Ambito |        |
|-----------------|----------|--------|--------|
|                 |          | Mínimo | Máximo |
| Edad (meses)    | 35       | 12     | 83     |
| Ninicial (n/ha) | 4575     | 278    | 13333  |
| Nactual (n/ha)  | 4277     | 264    | 12933  |
| Neje (n/ha)     | 4755     | 320    | 13000  |
| S_Vivencia (%)  | 94       | 64     | 100    |
| Dap (cm)        | 4,9      | 1,6    | 10,8   |
| H (m)           | 6,3      | 2,3    | 12,0   |
| Hd (m)          | 7,4      | 1,9    | 15,0   |
| IS              | 9,4      | 6,2    | 14,4   |

\* La descripción de las variables están en el Cuadro 1.

## 2. Modelo de predicción

El Cuadro 16 muestra la serie de ecuaciones que comprende el modelo global. Para la estimación de índice de sitio se seleccionó el modelo "a) común" con una edad base de 48 meses. De acuerdo con este modelo la Figura 18 presenta las curvas de índice de sitio de 7, 9 y 11 m, las cuales representan el punto medio de los sitio pobres, regulares y buenos, respectivamente.

Para estimar el número de árboles por hectárea actual ( $N_{actual}$ ) se aplicó la mortalidad promedio en el primer año.

La ecuación para estimar el peso seco de leña fue desarrollado por Camacho et al. (1989) con base en 41 parcelas de aprovechamiento en los seis países de la región centroamericana.

La Figura 19 presenta el comportamiento de Dap con los índices de sitio de 7, 9 y 11 m y densidades de plantación de 6400, 4444 y 2500 árboles por hectárea. Las combinaciones índice de sitio/densidad en el gráfico fueron seleccionadas para demostrar los extremos en el crecimiento en diámetro. Es interesante notar que la densidad de plantación tiene efecto significativo en el crecimiento en diámetro.

La Figura 20 presenta el rendimiento en peso seco de leña (PSL en tonelada por hectárea) con diferentes índices de sitio y densidades de plantación, y la Figura 21 los incrementos en PSL bajo condiciones medias.

En el Cuadro 17 se presentan unas tablas de rendimiento para *Leucaena leucocephala* bajo condiciones medias de la especie (un índice de sitio de 7, 9 y 11 una densidad de plantación de 2500 y 4,444 árboles por hectárea).

**Cuadro 16. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de *Leucaena leucocephala* en América Central.**

Estimación de índice de sitio (IS) en m: Modelo "a) común"

$$\ln(\text{IS}) = a + (\text{Edad}^k / \text{Edad base}^k) * (\ln(\text{Hd}) - a) \quad (38)$$

$a = 3,168$   
 $k = 0,4557$   
 Edad base = 48 meses  
 $R^2 = 88 \%$   
 $n = 613$

Estimación de número de árboles por hectárea ( $N_{\text{actual}}$ )

$$N_{\text{actual}} = a * N_{\text{inicial}} \quad (39)$$

$a = 0,940$

Estimación de la altura media (H) en m

$$\ln(H) = a + b/\text{Edad} + c * \ln(\text{IS}) \quad (40)$$

$a = 0,6707 \quad (0,0739)$   
 $b = -15,74192 \quad (0,3123)$   
 $c = 0,7708 \quad (0,0326)$   
 $R^2 = 84 \%$   
 $n = 598$

Estimación del Dap en cm

$$\text{Dap} = c1 * \text{IS} * (1 - \text{EXP}(-c2 * (10000 / N_{\text{inicial}})^{c3 * \text{Edad}}))^{(c4 * \text{IS} + c5)} \quad (41)$$

$c1 = 1,3716 \quad (0,275)$   
 $c2 = 0,004592 \quad (0,00240)$   
 $c3 = 0,3678 \quad (0,0212)$   
 $c4 = 0,1650 \quad (0,0405)$   
 $c5 = 0,5562 \quad (0,134)$   
 $R^2 = 76 \%$   
 $n = 611$

Estimación del peso seco de leña (PSL) en kg/árbol (Camacho et. al., 1989)

$$\text{PSL} = a * (\text{Dap}^2 * H) \quad (42)$$

$a = 0,025$   
 $R^2 = 96 \%$

\* El valor en paréntesis es el error estándar de la estimación del coeficiente.

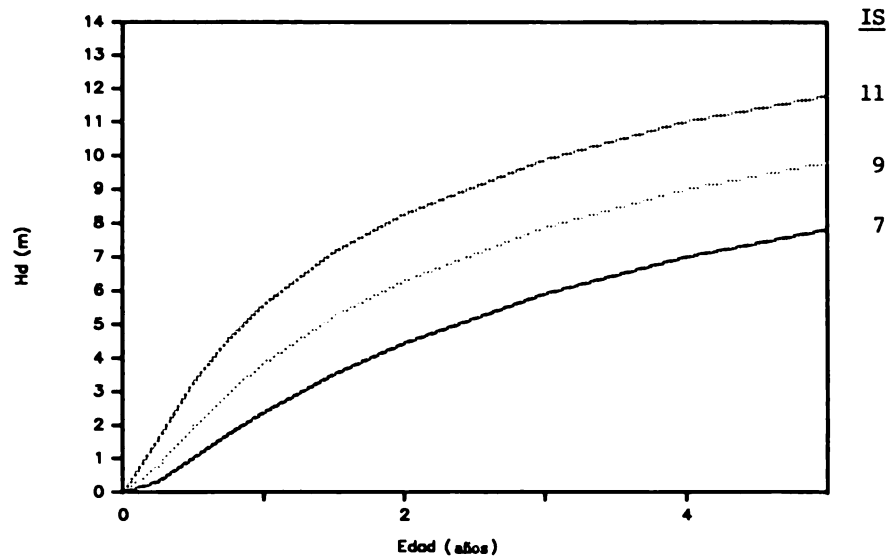


Figura 18. Curvas de índice de sitio para *Leucaena leucocephala* en América Central.

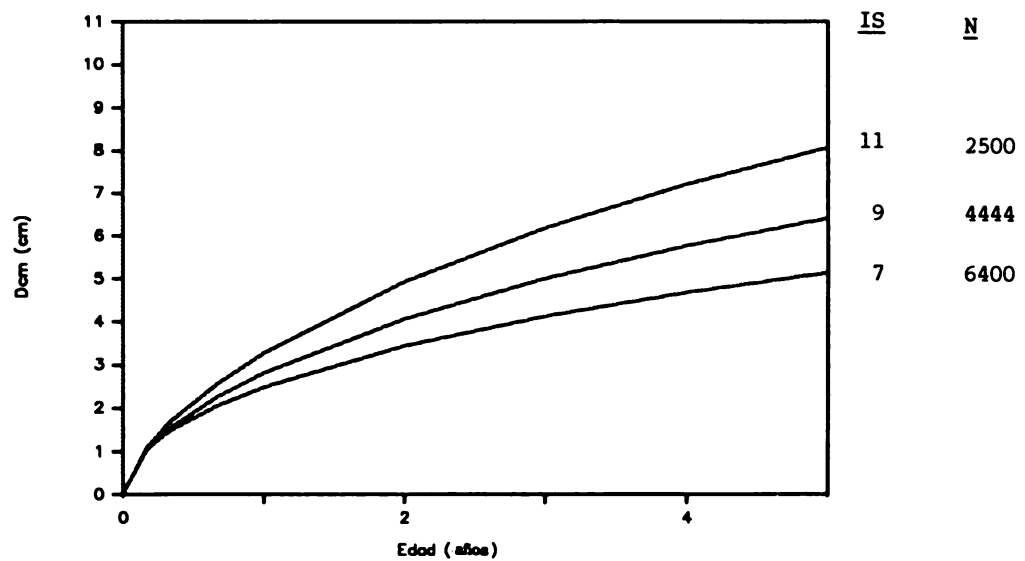


Figura 19. Desarrollo en Dap de *Leucaena leucocephala* para los índices de sitio de 7, 9 y 11 m, para densidades de plantación de 6400, 4444 y 2500 árboles por hectárea, respectivamente, en América Central.

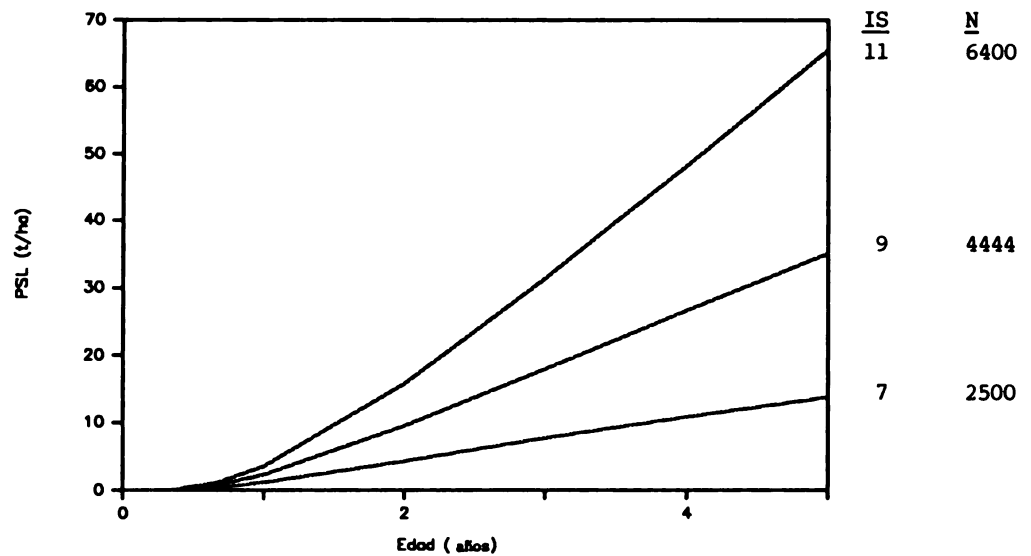


Figura 20. Producción en peso seco de leña (PSL) de *Leucaena leucocephala* para los índices de sitio de 7, 9 y 11 m y densidades de plantación de 2500, 4444 y 6400 árboles por hectárea en América Central

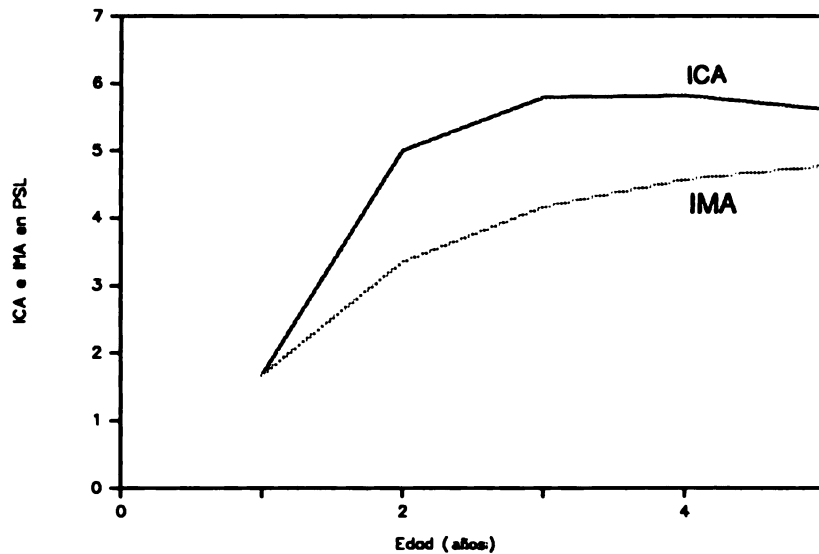


Figura 21. Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en PSL de *Leucaena leucocephala* para un índice de sitio de 9 y una densidad de plantación de 2500 árboles por hectárea.

Cuadro 17. Tablas de rendimiento de *Leucaena leucocephala* para índices de sitio de 7, 9 y 11, y para densidades de plantación de 2500 y 4444 árboles por hectárea.

IS = 7       $N_{inicial} = 2500$

| edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 2350     | 2,9      | 2,4   | 1,6                    | 1,2        | 1,2        | 1,2        |
| 2           | 2350     | 4,0      | 4,5   | 3,0                    | 4,3        | 3,1        | 2,2        |
| 3           | 2350     | 4,8      | 5,7   | 4,2                    | 7,7        | 3,3        | 2,6        |
| 4           | 2350     | 5,4      | 6,3   | 5,4                    | 10,8       | 3,2        | 2,7        |
| 5           | 2350     | 5,9      | 6,7   | 6,4                    | 13,8       | 3,0        | 2,8        |

IS = 7       $N_{inicial} = 4444$

| edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 4177     | 2,7      | 2,4   | 2,3                    | 1,7        | 1,7        | 1,7        |
| 2           | 4177     | 3,7      | 4,5   | 4,4                    | 6,4        | 4,6        | 3,2        |
| 3           | 4177     | 4,4      | 5,7   | 6,3                    | 11,3       | 5,0        | 3,8        |
| 4           | 4177     | 5,0      | 6,3   | 8,0                    | 16,2       | 4,8        | 4,0        |
| 5           | 4177     | 5,4      | 6,7   | 9,7                    | 20,7       | 4,6        | 4,2        |

IS = 9       $N_{inicial} = 2500$

| edad (años) | N (N/ha) | Dap (cm) | H (m) | G (m <sup>2</sup> /ha) | PSL (t/ha) | ICA (t/ha) | IMA (t/ha) |
|-------------|----------|----------|-------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1           | 2350     | 3,2      | 2,9   | 1,8                    | 1,7        | 1,7        | 1,7        |
| 2           | 2350     | 4,5      | 5,5   | 3,8                    | 6,7        | 5,0        | 3,3        |
| 3           | 2350     | 5,6      | 6,9   | 5,7                    | 12,5       | 5,8        | 4,2        |
| 4           | 2350     | 6,4      | 7,7   | 7,5                    | 18,3       | 5,8        | 4,6        |
| 5           | 2350     | 7,1      | 8,2   | 9,2                    | 23,9       | 5,6        | 4,8        |



**Cuadro 17. Continuación.**IS = 9      N<sub>inicial</sub> = 4444

| edad<br>(años) | N<br>(N/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | G<br>(m <sup>2</sup> /ha) | PSL<br>(t/ha) | ICA<br>(t/ha) | IMA<br>(t/ha) |
|----------------|-------------|-------------|----------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1              | 4177        | 2,8         | 2,9      | 2,6                       | 2,4           | 2,4           | 2,3           |
| 2              | 4177        | 4,1         | 5,5      | 5,4                       | 9,6           | 7,3           | 4,8           |
| 3              | 4177        | 5,0         | 6,9      | 8,2                       | 18,0          | 8,4           | 6,0           |
| 4              | 4177        | 5,8         | 7,7      | 10,9                      | 26,6          | 8,6           | 6,7           |
| 5              | 4177        | 6,4         | 8,2      | 13,5                      | 35,1          | 8,5           | 7,0           |

IS = 11      N<sub>inicial</sub> = 2500

| edad<br>(años) | N<br>(N/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | G<br>(m <sup>2</sup> /ha) | PSL<br>(t/ha) | ICA<br>(t/ha) | IMA<br>(t/ha) |
|----------------|-------------|-------------|----------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1              | 2350        | 3,3         | 3,3      | 2,0                       | 2,1           | 2,1           | 2,1           |
| 2              | 2350        | 4,9         | 6,4      | 4,5                       | 9,2           | 7,1           | 4,6           |
| 3              | 2350        | 6,2         | 8,0      | 7,1                       | 18,0          | 8,8           | 6,0           |
| 4              | 2350        | 7,2         | 8,9      | 9,6                       | 27,3          | 9,3           | 6,8           |
| 5              | 2350        | 8,1         | 9,6      | 12,0                      | 36,5          | 9,2           | 7,3           |

IS = 11      N<sub>inicial</sub> = 4444

| edad<br>(años) | N<br>(N/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | G<br>(m <sup>2</sup> /ha) | PSL<br>(t/ha) | ICA<br>(t/ha) | IMA<br>(t/ha) |
|----------------|-------------|-------------|----------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1              | 4177        | 2,9         | 3,3      | 2,7                       | 2,9           | 2,9           | 2,9           |
| 2              | 4177        | 4,4         | 6,4      | 6,2                       | 12,8          | 9,9           | 6,4           |
| 3              | 4177        | 5,5         | 8,0      | 9,9                       | 25,3          | 12,5          | 8,5           |
| 4              | 4177        | 6,4         | 8,9      | 13,6                      | 38,8          | 13,4          | 9,7           |
| 5              | 4177        | 7,2         | 9,6      | 17,2                      | 52,4          | 13,6          | 10,5          |

### 3. Verificación y validación del modelo

Los Cuadros 18 y 19 presentan los resultados de la verificación y validación, respectivamente, del modelo de predicción del crecimiento y rendimiento. La verificación se realizó con los datos utilizados para construir el modelo, y la validación con una muestra aleatoria e independiente de 15 parcelas. Las estadísticas en estas tablas corresponden a la diferencia entre el valor calculado (o predicho) con el modelo y el observado (valor real).

Los valores pequeños en los promedios de las diferencias demuestran que, en general, el modelo no sub-estima ni sobre-estima los valores reales. Además, la

precisión para estimar el crecimiento de parcelas individuales es adecuada, ya que los coeficientes de variación (cv) de 9% a 15% son bastante bajos. La poca precisión encontrada en la estimación del rendimiento en volumen (cvs de 56% y 35%) se considera que es causada por el efecto complementario del desajuste para estimar los parámetros que se usan para calcular el volumen ( $N_{\text{actual}}$ , Dap y altura). Hay que tomar este nivel de precisión en cuenta en la aplicación del modelo para estimar el rendimiento en área específicas.

Es interesante notar que el modelo ajustó mejor a la muestra independiente que el grupo de datos utilizados en su construcción. Se contribuye con éste a una característica de la muestra y no de la especie.

**Cuadro 18.** Resultados de la verificación del modelo con las parcelas utilizadas para construir el modelo (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).

| Estadística          | Parámetros del crecimiento    |             |          |               |
|----------------------|-------------------------------|-------------|----------|---------------|
|                      | $N_{\text{actual}}$<br>(n/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | PSL<br>(t/ha) |
| Tamaño de la muestra | 619                           | 606         | 594      | 580           |
| Promedio             | 23,0                          | -0,5        | 0,0      | -2,0          |
| Desviación estándar  | 399,5                         | 1,03        | 0,82     | 10,14         |
| cv/ <sup>*</sup> (%) | 9,3                           | 20,4        | 12,5     | 56,0          |

\* cv = coeficiente de variación = desviación estándar de la diferencia dividido por el valor medio del observado.

**Cuadro 19:** Los resultados de la validación del modelo con una muestra de 15 parcelas (las estadísticas corresponden a las diferencia entre el valor calculado y el valor observado).

| Estadística          | Parámetros del crecimiento    |             |          |               |
|----------------------|-------------------------------|-------------|----------|---------------|
|                      | $N_{\text{actual}}$<br>(n/ha) | Dap<br>(cm) | H<br>(m) | PSL<br>(t/ha) |
| Tamaño de la muestra | 64                            | 64          | 64       | 64            |
| Promedio             | 34,3                          | 1,2         | -0,1     | 2,1           |
| Desviación estándar  | 407,0                         | 0,61        | 0,78     | 7,31          |
| cv (%)               | 10,6                          | 8,9         | 15,0     | 35,4          |

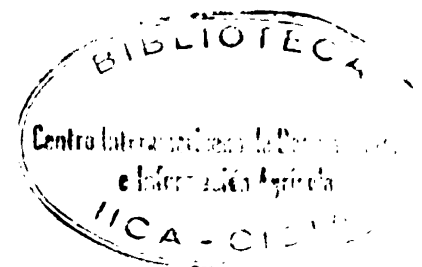
## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por las características comunes de crecimiento (rápido y con turnos cortos para la producción de biomasa) los modelos de predicción del crecimiento y rendimiento tuvieron el mismo patrón. Dicho patrón consiste en una serie de ecuaciones matemáticas que estiman los diferentes parámetros del rodal y que constituyen el modelo global; el cual ha sido incorporado dentro de una hoja electrónica para generar las tablas de rendimiento.

Para las cuatro especies las ecuaciones individuales para estimar los parámetros del rodal lograron un ajuste aceptado a los datos de campo. Esto se manifiesta por los coeficientes altos de determinación de las diferentes regresiones individuales. Sin embargo, las verificaciones y validaciones demostraron dispersiones altas en las diferencias entre el rendimiento en peso seco de leña (PSL) o volumen calculado con los modelos y los valores observados (coeficientes de varianza superiores al 40%). Esto se debe a la gran variedad de condiciones y tratamientos entre las parcelas analizadas, y al efecto complementario de los errores al predecir la densidad actual, diámetro y la altura sobre la predicción del rendimiento.

En la interpretación de la validación, es importante tomar en cuenta que las muestras de datos de validación no son cien por ciento independientes de las muestras para construir los modelos. Esto se debe a que muchas de las parcelas de ambas muestras vienen de los mismos ensayos utilizados para la predicción. El ajuste del modelo a una muestra de datos completamente independiente podría ser inferior del ajuste presentado en la validación.

La Figura 22 presenta una comparación en el crecimiento en términos de del incremento medio anual en peso seco de leña. De acuerdo con los modelos desarrollados, los incrementos fueron calculados para plantaciones con una densidad inicial de 2500 árboles por hectárea y bajo condiciones medias de los sitios estudiados para cada especie; índices de sitio de 13,9, 5,2, 5,5 y 9,4 para las especies *Eucalyptus camaldulensis*, *Gilricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* respectivamente. Esta comparación muestra que *Eucalyptus camaldulensis* y *Leucaena leucocephala* tienen turnos biológicos relativamente largos (mayores de 5 años), y que *Gilricidia sepium* y *Guazuma ulmifolia* tienen turnos cortos (entre 2 a 4 años). Como las condiciones medias no son las mismas para cada especie, no se puede aplicar esta comparación a sitios específicos.



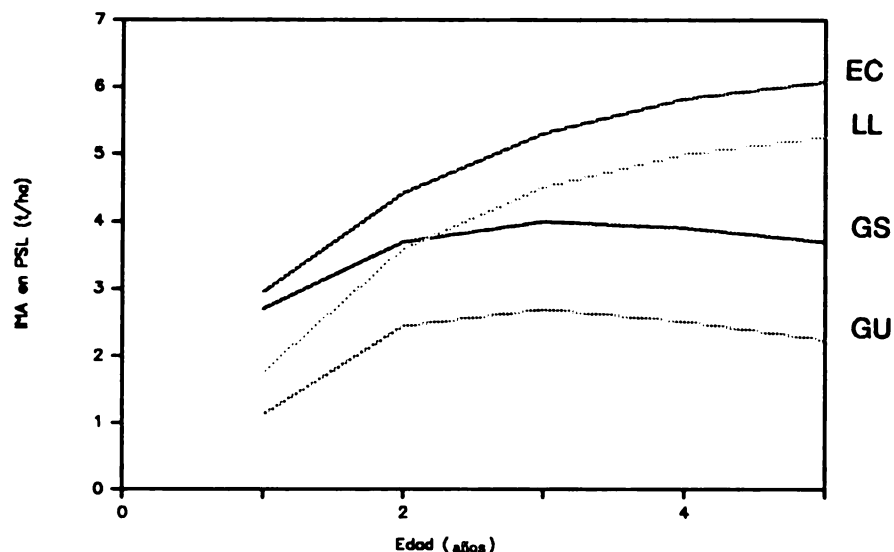


Figura 22. El incremento medio anual (IMA) en peso seco de leña para *Eucalyptus camaldulensis* (EC), *Gilricidia sepium* (GS), *Guazuma uimifolia* (GU) y *Leucaena leucocephala* (LL).

## 1. Aplicación de los modelos generados

Para la aplicación de los modelos de predicción hay que considerar dos parámetros; la calidad de sitio y la densidad de plantación (número de árboles por hectárea). Determinando los valores para estos dos parámetros, se emplean las ecuaciones del modelo global para generar la tabla de rendimiento correspondiente, o seleccionar la tabla con las condiciones más cercanas entre las tablas presentada en este documento.

En el caso de que se quiere predecir el rendimiento de una plantación existente, se compara la altura media de la plantación con la altura media de las tablas de diferentes índices de sitio a la edad de la plantación. El índice de sitio seleccionado es el que corresponde a la altura en la tabla más cercana a la altura real. Igualmente, se compara la densidad actual de la plantación con las densidades actuales de las diferentes tablas. La tabla seleccionada para predecir el rendimiento de la plantación es la que tiene un índice de sitio seleccionado y la densidad actual más cercana a la de la plantación. Asimismo, si la altura o la densidad de la plantación no está entre los valores de dos tablas, se puede interpolar (promediar) los valores de estas dos tablas.

La predicción del rendimiento potencial de un sitio donde no está establecida una plantación es más difícil porque no tiene la altura para estimar la calidad de sitio. Primero hay que determinar si el sitio de interés es un sitio bueno, regular, pobre. Esto se puede hacer con base en una evaluación cualitativa utilizando, por ejemplo, la pendiente, vigor de la vegetación presente, indicaciones de erosión entre otros. Se selecciona la tabla con el índice de sitio correspondiente a la evaluación del sitio y con la densidad más cercana a la densidad de interés.

Cabe mencionar que los modelos solamente son válidos dentro de los ámbitos de valores de los datos utilizados para la construcción de los mismos, y dentro de las limitaciones descritas para el lector. Hay que tomar en consideración la precisión de los modelos demostrada en las verificación y validación de cada uno. Además, la aplicación de todos los modelos lleva la suposición de que la plantación recibirá un manejo adecuado (limpías, control de plagas, replantación de árboles muertos durante el primer año) y, por lo tanto, se observará muy poca mortalidad.

## **2. Recomendaciones**

Se recomienda para investigaciones futuras la incorporación de nuevas mediciones en la base de datos y el reajuste de los coeficientes en cada una de las ecuaciones dentro de los modelos. Esto contribuiría a mejorar el ajuste de los modelos y permitir su aplicación a edades superiores.

También, se deben desarrollar ecuaciones para predecir el rendimiento de diferentes productos forestales; además hay que introducir variaciones en los modelos para predecir el crecimiento y rendimiento de las especies en diversos sistemas de producción (cercas vivas, rebrotes).

Para *Eucalyptus camaldulensis* se recomienda desarrollar una ecuación para estimar el volumen y la biomasa con el diámetro y altura, con base en un grupo de datos que cubran una variedad de sitios de la Región. También se recomienda la incorporación al modelo de un programa de raleos.

Cuando hayan datos independientes de los utilizados en este estudio sería útil realizar validaciones y reajustes de los modelos presentados.

Sobre todo, se recomienda la aplicación de los modelos en otros sitios similares y con plantaciones que no fueron incluidas para el desarrollo de los modelos, y la comunicación de estas experiencias para identificar las fortalezas y debilidades de los modelos y, asimismo, mejorarlos.

## BIBLIOGRAFIA

- ALDER, D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. FAO: Montes, no. 22.
- BERTALANFFY, VON L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quart.Rev.Biol.* 32:217-231.
- BRUCE, D.; WENSEL, L.C. 1987. Modelling forest growth: approaches, definitions, and problems. In IUFRO Conference "Forest Growth Modelling and Prediction" (1987, Minnesota, EUA) Proceedings Minnesota, EE.UU. IUFRO p.
- CLUTTER, L.C., et al. 1983. Timber Management: A Quantitative Approach. New York, EE.UU. John Wiley. 333 p.
- CAMACHO, P.; LOWELL, K.; HENDERSON, G. 1989. Management and site considerations for predicting growth of *Leucaena leucocephala* (Informe interno). Columbia. CATIE/University of Missouri. 17 p.
- CAMPOS, J.J. 1989a. Predicción de la productividad de *Eucalyptus camaldulensis*; I pt. Curvas de índice de sitio (Informe interno). Turrialba, C.R. CATIE, Proyecto Madeleña. 14 p.
- CAMPOS, J.J. 1989b. Predicción de la productividad de *Eucalyptus camaldulensis*; segunda parte: Asociación del índice de sitio con variables ambientales (Informe interno). Turrialba, C.R. CATIE, Proyecto Madeleña. 16 p.
- CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA, 1986. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 86. CATIE.
- CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA, 1989. Curso centroamericano de Silvicultura de Plantaciones de Especies de Árboles de Uso Múltiple (3, 1989, Guatemala, GUA). 1989. Memoria. Turrialba, C.R., CATIE.
- EHRlich, M., 1986. Fuelwood and biomass yield tables for *Leucaena leucocephala*, *Cassia siamea*, *Azadirachta indica*, *Columbrina arborens*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Prosopis juliflora* in Haiti. USAID Project No. 521-0122, Agroforestry outreach research Project, University of Maine. 54 p.
- HARRISON, W.C., DANIELS, R.F. 1987. A new biomathematical model for growth and yield of loblolly pine plantations. In IUFRO Conference "Forest Growth Modelling and Prediction" (1987, Minnesota, EE.UU) Proceedings. 12 p.
- HUGHELL, D., 1989a. Metodología para el desarrollo de curvas de índice de sitio: estudio de caso *Gliricidia sepium* en América Central (Informe interno). Turrialba, C.R. CATIE, Proyecto Madeleña. 13 p.

- ORTIZ, E. Utilización del índice de densidad del rodal (IDR) en el manejo de la densidad de plantaciones forestales. Cartago, C.R. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 13 p.
- PIENAAR, L.V., TURNBULL, K.J. 1973. The Chapman-Richards Generalization of von Bertalanffy's Growth Model for Basal Area Growth and Yield in Even-Aged Stands. *Forest Sci.* 19:2-22
- REINEKE, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Agric.Res.* 46:627-638
- RICHARDS, F.J., 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journ.of Exper.Botany.* 10 (29): 290-300
- SANTANDER, C., CAMPOS, J. 1988. El Guácimo (*Guazuma uimifolia* Lam.), especie forestal de uso múltiple para los trópicos húmedos. San José, C.R. CASAF. 30 p.
- UGALDE, L., OTAROLA, A. 1981. Tabla de volumen para *Eucalyptus camaldulensis* en Nicaragua. Turrialba, C.R. CATIE, Proyecto Leña. 30p.
- VALLE, DEL J.I. 1986. La ecuación de crecimiento de Von Bertalanffy en la determinación de la edad y el crec. de arboles tropicales. *Rev.Fac.Agr.* 39(1):61-74

## **PERSONAL TECNICO DEL CATIE/PROYECTO MADELEÑA\***

### **JEFATURA**

Rodolfo Salazar, Ph.D.  
Hernán Rodríguez, Lic.

Líder Regional  
Administración

### **SILVICULTURA**

Miguel Musálem, Ph.D.  
David Hughell, M.Sc.  
Valentín Jiménez, Ing.  
Ricardo Luján, Ing.  
Luis Ugalde, Ph.D.

Silvicultor Principal  
Modelación  
Silvicultura  
Silvicultura  
Manejo de Información

### **SOCIOECONOMIA**

Thomas McKenzie, M.Sc.  
Dean Current, M.Sc.  
Carlos Reiche, M.Sc.  
Manuel Gómez, M.Sc.

Economista Principal  
Socioeconomía/Manejo de Información  
Economía  
Economista Asistente

### **EXTENSION**

Carlos Rivas, M.Sc.  
Héctor Chavarría, Lic.  
Ana Loaiza, Bch.  
Emilio Hidalgo de Caviedes, Lic.  
Carlos Granados, Lic.

Extensionista Principal  
Extensionista Asistente  
Diseño Gráfico  
Editor  
Documentación

### **PAISES**

#### **GUATEMALA**

Carlos Figueroa, M.Sc.  
Eberto de León, Lic.

Coordinador Nacional  
Economía

#### **HONDURAS**

Rolando Ordoñez, Das.  
Juan Pastora, Lic.

Coordinador Nacional  
Economía

#### **EL SALVADOR**

Hugo Zambrana, M.Sc.  
Modesto Juárez, M.Sc.

Coordinador Nacional  
Economía

#### **COSTA RICA**

Carlos Navarro, M.Sc.  
William Portilla

Coordinador Nacional  
Economía

#### **PANAMA**

Blás Morán, Ing.  
Rafael Tirado, Lic.  
Sebastián Sutherland, Das.

Coordinador Nacional  
Economía  
Silvicultura

---

\*/ Madeleña es un proyecto de investigación, capacitación y diseminación del cultivo de árboles de uso múltiple en América Central y Panamá. Es financiado por AID/ROCAP, y ejecutado por INRENARE de Panamá, DGF de Costa Rica, COHDEFOR de Honduras, CENREN de El Salvador, DIGEBOS de Guatemala con la coordinación regional del CATIE.



## FE DE ERRATAS

En la página 7, la ecuación del Dap cuadrático medio por árbol (cm), debe leerse como sigue:

$$D_{cm} = \sqrt{\frac{\sum \text{dap } e_{je}^2}{n_{\text{árbol}}}}$$

**Publicación del Proyecto Cultivo de Arboles de Uso Múltiple  
MADELEÑA/CATIE/ROCAP 596-0117**

**Editor : Emilio Hidalgo de Caviedes**

**Montaje de Artes Finales : Ana Loaiza**

**Levantado Texto : Carlos Solano**

**Impreso en Litografía e Imprenta LIL, S.A.- Tel. 35-0011**

**Edición de 1000 ejemplares**

**Se terminó de imprimir en el mes de Setiembre de 1990**