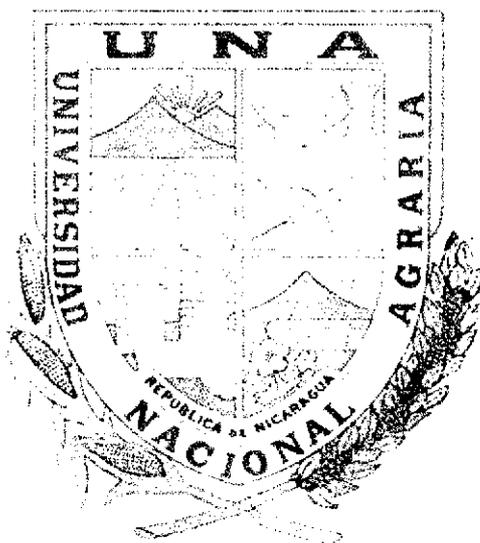


**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Curvas de Índice de Sitio para *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh en plantaciones puras del Ingenio San Antonio, Chinandega.**

**AUTOR: Br. CÉSAR AUGUSTO CHÁVEZ GRANERA**

**ASESOR: Ing. M.Sc. EDILBERTO DUARTE**

**Managua, Nicaragua**

**Marzo, 2001**

## AGRADECIMIENTOS

- A Dios por sobre todas las cosas, por brindarme Su Luz en todos los momentos de mi vida.
- A mi buen amigo el Ingeniero Alberto Sandino, por su ayuda incondicional y conocimientos brindados para la elaboración de este trabajo.
- A mi Asesor Ing. M.Sc. Edilberto Duarte, por aclarar esos momentos de dudas que se presentaron.
- A mi tía Yolanda Granera, por el albergue brindado durante mis años de estudio.
- A doña Idalia Casco, por el apoyo desinteresado que me brindó, sin el cual no fuese posible completar mis estudios.
- A Freddy Uriarte, por su valiosa colaboración prestada.
- A mi amigo el Ingeniero Freddy Ramírez, por sus acertadas recomendaciones.
- A la comunidad de docentes de la Universidad Nacional Agraria, por toda la gama de conocimientos e instrucciones que me brindaron sin egoísmos, ni reproches y que hicieron posible culminar esta bella carrera.
- A mi familia, amigos y a todos los que de alguna manera colaboraron con la realización de este trabajo.

César Augusto Chávez Granera.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres: Rosario Granera Mendoza y César Chávez Leiva, por todos esos años de sacrificio y desvelos que hicieron posible llegar a esta fecha.

César Augusto Chávez Granera.

# CONTENIDO

<b>Sección</b>	<b>Página</b>
AGRADECIMIENTOS .....	i
DEDICATORIA .....	ii
CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	vii
RESUMEN.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1. Taxonomía de la especie.....	4
2.2. Descripción botánica y caracteres especiales de crecimiento.....	4
2.3. Distribución y requerimientos ecológicos.....	5
2.4. Calidad de sitio.....	6
2.4.1. Objetivo de la evaluación de la calidad de sitio	7
2.4.2. Métodos de evaluación de la calidad de sitio	8
2.4.2.1. Métodos directos.....	9
2.4.2.2. Métodos indirectos.....	10
2.4.2.2.1. Evaluación en base a la altura.....	11
2.4.3. Índice de sitio.....	12
2.5. Curvas de índice de sitio.....	12
2.5.1. Principio de anamorfismo.....	12
2.5.2. Tipos de datos: Parcelas temporales.....	13

2.5.3.	Métodos construcción de curvas de índice de sitio.....	14
2.5.3.1.	Construcción por métodos gráficos.....	14
2.5.3.2.	Construcción por métodos matemáticos.....	14
2.6.	Estadígrafos empleados en el análisis de regresión.....	16
III.	METODOLOGÍA.....	17
3.1.	Ubicación y descripción general del sitio. ....	17
3.2.	Establecimiento del estudio.....	18
3.2.1.	Descripción general de los sitios de muestreo....	18
3.2.2.	Levantamiento de información e instrumentos utilizados. ....	18
3.2.3.	Planteamiento de modelos.....	21
3.2.4.	Estadígrafos y estadísticos empleados para el análisis de los modelos seleccionados.....	22
3.3.	Manejo de datos y procesamiento de la información.....	23
3.4.	Construcción de las curvas de índice de sitio.....	24
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
4.1.	Ajuste de modelos y estadísticos obtenidos.....	26
4.1.1.	Coefficiente de determinación ( $R^2$ ).....	26
4.1.2.	Coefficiente de correlación (R).....	26
4.1.3.	Desviación estándar residual (S).....	26
4.1.4.	Estadísticos de distribución F y T – student.....	27
4.2.	Elección del modelo.....	27
4.3.	Construcción de las curvas de índice de sitio.....	28
4.4.	Discusiones.....	33
4.4.1.	Gráfico.....	33
4.4.2.	Teoría sobre la calidad de estación.....	33

V. CONCLUSIONES.....	35
VI. RECOMENDACIONES.....	36
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	37
VIII. ANEXOS.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Número</b>		<b>Página</b>
1	Mapa de ubicación de zonas de muestreo .....	20
2	Familia de curvas de índice de sitio.....	32

## ÍNDICE DE CUADROS

Número		Página
1	Características generales de lotes evaluados para la construcción de las curvas de índice de sitio.....	19

## RESUMEN

Las plantaciones forestales representan un potencial para el desarrollo forestal en Nicaragua, por esta razón es necesario contar con las herramientas necesarias para su manejo, el cual permita maximizar su rendimiento y contribuir al proceso de ordenamiento y producción forestal, en este contexto se llevaron a cabo las investigaciones necesarias para la construcción de una familia de curvas anamórficas de índice de sitio para *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh en plantaciones monoespecíficas ubicadas en el Ingenio San Antonio, Chinandega, Nicaragua. La investigación tuvo como base una muestra de 231 parcelas temporales, como marco representativo de dos variables de estado, la edad y el promedio de las alturas de los tres árboles más altos por unidad de muestreo.

De estas variables tasadas se conformó una base de datos para ajustar once modelos de los cuales se seleccionó uno para construir la familia de curvas a través del método de pendiente común, los principales estadígrafos de regresión usados fueron: el coeficiente de correlación (R), y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la desviación estándar residual (S) y los análisis gráficos de residuales de cada modelo. Para efectos de comparación se aplicaron las pruebas de F y T-student ya que de los once modelos, diez se transformaron a bases logarítmicas. El modelo seleccionado fue  $\ln H = 2.5576 + 6.2283/E - 37.4239/E^2 + 44.5599/E^3$ . Donde ln: es el logaritmo natural, H: es el promedio de las alturas en metros y E: es la edad en años.

Las curvas generadas para la identificación de calidades de sitio de una forma rápida y segura se agruparon en cinco tipos de calidades presentadas de la siguiente manera:

Calidad de sitio I = Índice de sitio alto (IS18)

Calidad de sitio II = Índice de sitio bueno (IS16)

Calidad de sitio III = Índice de sitio medio (IS14)

Calidad de sitio IV = Índice de sitio regular (IS12)

Calidad de sitio V = Índice de sitio bajo (IS10)

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente los bosques naturales tropicales a nivel mundial se encuentran en un acelerado proceso de degradación y destrucción (Lamprecht, 1990), en Nicaragua la situación es similar y por ejemplo; según proyecciones realizadas en la década del noventa por el Plan de Acción Forestal (PAF-NIC, 1992), los bosques productivos de latifoliadas en el país podrían desaparecer a partir de entonces dentro de los próximos 10 a 15 años. En este marco el establecimiento de plantaciones representa un importante potencial para el desarrollo del sector forestal en Nicaragua; sin embargo, las plantaciones al igual que los bosques naturales requieren de un manejo forestal adecuado para poder elevar la cantidad y calidad de su producción, haciéndose necesario conocer elementos descriptivos del estado, la dinámica de crecimiento y rendimiento de dichas masas forestales; elementos tales como la edad, el incremento, el volumen y la calidad de sitio (FAO, 1981). Basados en esta premisa nos proponemos contribuir con un aporte sustancial sobre el estudio de calidades de sitio en plantaciones forestales, las cuales pueden ser determinadas en base al análisis de dos variables de estado como lo son la edad y la altura de los árboles de una masa forestal; la relación que ocurre entre estas dos variables puede representarse en forma de un modelo matemático que se obtiene a través del estudio y comparación de diferentes representaciones o modelos que reflejen comportamientos distintos de la relación entre las variables estudiadas, de este modo el modelo seleccionado será el que represente de manera más exacta

la relación existente entre la edad y la altura. Una vez definidos los modelos es necesario encontrar sus parámetros, los que serán estimadores de la relación entre las variables en cada modelo. Para obtener estos parámetros se emplea el método de los mínimos cuadrados (Mendehall y Scheaffer, 1986).

El principal objetivo de este trabajo es la construcción de curvas de índice de sitio que expresen la correlación entre la altura y la edad, a través de las cuales se pueda estimar el índice de sitio, para lo cual es necesario obtener un modelo matemático que estime con mayor verosimilitud la calidad de sitio donde se desarrollan las plantaciones puras de *E. camaldulensis* Dehnh ubicadas en el Ingenio San Antonio, Departamento de Chinandega, Nicaragua, lo cual facilitará el proceso de ordenación, manejo y producción de la masa forestal en estudio, además de poder evaluar el potencial productivo del sitio mediante las curvas generadas en este proceso.

Es necesario mencionar que los resultados obtenidos en este trabajo únicamente son aplicables al área de estudio, la cual presenta características climáticas, edáficas y morfológicas propias; sin embargo este trabajo puede servir para ampliar la información existente sobre el comportamiento de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, en Nicaragua de acuerdo a las condiciones dadas y aportar información adicional para la metodología de construcción de curvas de índice de sitio para esta especie en el país.

Los objetivos planteados en este trabajo son los siguientes:

### Objetivo General

- Generar curvas de índice de sitio en plantaciones puras de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh en el Ingenio San Antonio.

### Objetivos Específicos

- Ajustar un modelo matemático para generar curvas de índice de sitio.
- Construir una familia de curvas de índice de sitio para el área de estudio.
- Clasificar los índices de sitio según su calidad en la zona de las plantaciones ubicadas en el Ingenio San Antonio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Taxonomía de la especie

El eucalipto es conocido en Australia como “River Red Gum”, donde “Gum” es el nombre popular para las especies dentro del género. Taxonómicamente la especie puede ubicarse dentro del orden Myrtales, en la familia Mirtaceae y dentro de la subfamilia Leptospermoidae; como parte del género *Eucalyptus* y finalmente se define como *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, var. *Camaldulensis* (Sinonimia con *Eucalyptus rostrata* Schlecht). En Centroamérica es conocido simplemente por el nombre de eucalipto.

### 2.2. Descripción botánica y caracteres especiales de crecimiento

El eucalipto es un árbol que alcanza entre unos 25 y 50 metros de altura en su área de distribución natural, presenta copa abierta e irregular, tronco torcido y corteza blanquecina y caduca en tiras anchas de color grisáceo a marrón; sus hojas adultas son coriáceas y rígidas, delgadas, pecioladas y pendientes, con bordes lisos y nerviación oblicua, penninervas y anastomosadas; color verde oscuro en el haz y verde claro en el envés. Sus inflorescencias se producen en cimas dicasiales y sus flores son pequeñas con numerosos estambres blancos. Sus frutos son cápsulas que cuando maduros son color marrón, las semillas que producen son muy pequeñas y su tamaño va de uno a dos milímetros de diámetro

aproximadamente; además de las semillas las cápsulas desprenden óvulos no fertilizados llamados paráfasis (FAO, 1981).

Entre otras características el eucalipto presenta una gran capacidad colonizadora debido a su abundante producción de semillas y otros mecanismos de reproducción entre los que se encuentran el lignotubérculo, brotes indefinidos y yemas de tipo accesorio, desnudas y epicórmicas; las cuales crecen y reemplazan tejidos dañados con gran rapidez y eficacia; de igual manera presenta una elevada producción de rebrotes por tocón. Estas cualidades hacen posible que el eucalipto pueda prosperar y producir cosechas aceptables en suelos relativamente pobres con estaciones secas prolongadas o en situaciones de inundaciones periódicas.

### **2.3. Distribución y requerimientos ecológicos**

Según la FAO (1981), el eucalipto ha sido plantado en todos los continentes en más de cien países aproximadamente, incluyendo a los que conforman el istmo centroamericano (CATIE, 1986).

En su ambiente natural el eucalipto sobrevive a un amplio rango de temperaturas que fluctúan desde temperaturas inferiores a cero grados centígrados hasta Temperaturas Medias Anuales (TMA) de 35° Centígrados. Con respecto a las lluvias, los rangos de precipitación en que esta especie se desarrolla oscilan entre los 250 a 625 milímetros de Precipitación Media Anual (PMA) y a estaciones secas de cuatro a ocho meses o superiores. El eucalipto

se desarrolla adecuadamente en su lugar de origen en altitudes que van de cero a 600 metros sobre el nivel del mar (msnm) e incluso superiores (FAO, 1981).

Según estudios realizados en Nicaragua (CATIE, 1986), el eucalipto se ha plantado con buenos resultados en rangos de TMA que oscilan entre 25.2°C. y 29.1°C., en sitios con precipitaciones medias anuales que fluctúan entre 885 mm hasta casi 2500 mm, con déficits hídricos de cinco a ocho meses y en altitudes que van desde los 40 msnm hasta los 480 msnm. El eucalipto ha sido plantado en la mayoría de los casos en suelos Inceptisoles, Mollisoles y Vertisoles, obteniéndose una producción satisfactoria.

#### **2.4. Calidad de sitio**

La calidad de sitio se define como la capacidad de un área determinada para el crecimiento de árboles. Es la respuesta de una determinada especie a la totalidad de las condiciones ambientales (edáficas, climáticas y bióticas) existentes en un determinado lugar. Su conocimiento resulta fundamental en la Ingeniería Forestal para elegir los mejores sitios, para plantar la especie apropiada en el lugar adecuado y para cambiar sus características (Prodan, 1997).

La calidad de sitio es una variable de estado que se utiliza como criterio para evaluar una estación de procedencia. sin embargo, diversos autores la definen de conformidad a sus propias

experiencias sin que ello genere algunas contradicciones, ya que al mismo concepto se le puede interpretar de distintas maneras y el significado es el mismo, siempre que sus elementos principales se mantengan presentes, por ejemplo:

Fonseca (1986), citando a la Sociedad Americana de Forestales indica que la calidad de sitio, también denominada estación, se define como un área ecológica con capacidad de producir bosques mediante la combinación de factores bióticos y abióticos.

Luque (1981), señala que la calidad del sitio es uno de los principales determinantes del crecimiento y rendimiento de la producción forestal por lo que su estudio es básico para el manejo forestal óptimo.

Rowe (citado por Chinchilla, 1989), lo define como la combinación de condiciones bióticas, climáticas y edáficas de un área con referencia a su capacidad de producir bosque.

Zepeda (1984), define calidad de sitio como el carácter o cualidades distintivas, que indican en forma un tanto relativa el grado de productividad en un lugar, bajo las condiciones imperantes del momento en que se efectúa la estimación de ésta.

#### **2.4.1. Objetivo de la evaluación de la calidad de sitio**

El objetivo es determinar el potencial del sitio para producir árboles, tomando en cuenta tanto el crecimiento de éstos como los

factores ambientales que lo determinan, lo que permite realizar una mejor planificación del manejo que se le debe brindar, ya que nos ofrece información acerca de la capacidad productiva de dicho sitio.

Según Vincent (1975), el estudio de la calidad de sitio tiene como objetivos:

- Estimación de rendimiento total en bosques tanto naturales como plantaciones.
- Planificación y realización de trabajos de investigación.
- Extrapolación de los valores de calidad de sitio a otras áreas no limitadas.
- Elaboración de mapas de calidad de sitio.

#### **2.4.2. Métodos de evaluación de la calidad de sitio**

Para la determinación de la calidad de sitio se han utilizado una variedad de métodos muy buenos los cuales han sido de gran utilidad en el ejercicio de la producción forestal, siendo de esta manera herramientas indispensables para la Ingeniería Forestal, aunque se utiliza con mayor frecuencia la altura en función de la edad.

Sobre la calidad de sitio existen clasificaciones diversas, de las cuales algunos autores coinciden en los aspectos básicos que toman en cuenta, mientras que otras generalizan o profundizan más la información de la calidad de sitio.

El primer problema acerca del sitio es cómo medirlo y en qué términos, al respecto se ha intentado separar un factor ambiental que sirva como indicador de la calidad de sitio, labor compleja y difícil, ya que para llegar a entender el crecimiento de los árboles relacionados con su medio ambiente no se pueden estudiar los factores individuales del sitio en forma aislada (Vélez, citado por Chinchilla, 1989).

La dificultad en separar factores que componen la calidad de sitio, ha hecho que los esfuerzos para evaluar este factor que mide la productividad se hayan orientado a encontrar un conjunto de características del bosque y del medio (sitio) que más afectan y mejor expresan el potencial de sitio de un área (Pulido, citado por Fonseca, 1986).

La evaluación de la calidad de sitio puede realizarse de dos formas: por métodos directos y por métodos indirectos (Prodan, 1997).

#### **2.4.2.1. Métodos directos**

A continuación se describen los métodos clásicos:

- a) Determinación del volumen o altura del rodal. Es difícil de interpretar, salvo que el rodal se encuentre cercano a una edad clave o de rotación usada como comparación.

- b) Registro histórico de desarrollo y rendimiento. Cada vez es más frecuente que las empresas conserven toda la información de inventarios sucesivos y también de las cosechas de los rodales. Estos datos están desprovistos de todo supuesto y su error es reducido.
  
- c) Intercepción, basada en la medición de longitudes internodales de un cierto número de años de crecimiento después de que el árbol haya alcanzado 1.3 m. Algunos autores recomiendan alturas mayores que 2 y 3 metros.
  
- d) Análisis fitosociológico y/o fisionómico de la vegetación presente en el área.

#### **2.4.2.2. Métodos indirectos**

Estos métodos conducen a la obtención de índices de sitio o productividad a través de análisis de regresión en tres formas diferentes:

1. Medición de uno o más factores del medio que se consideran como íntimamente relacionados con el crecimiento de los árboles.
  
2. Determinación de características propias de los árboles o del rodal consideradas sensibles a la calidad de sitio.
  
3. Una combinación de las anteriores.

#### **2.4.2.2.1. Evaluación en base a la altura**

Según Chinchilla (1989), entre los factores que intervienen en la producción volumétrica se encuentra la altura dominante por considerarla como la variable que refleja con mayor fidelidad las variaciones del sitio, ya que ésta se comporta de forma independiente sin ser afectada por la densidad y tratamientos silvícolas aplicados al rodal, además la medición de la altura es una operación relativamente fácil de lograr en plantaciones forestales artificiales.

La altura dominante desde el punto de vista técnico, se define como la altura promedio de los cien árboles más grandes por hectárea (Alder citado por Hughell, 1990), sin embargo, como en el presente caso, la mayoría de las parcelas que han sido evaluadas son 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 una unidad muestral, en este caso un solo 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 (Hughell 1990).

### **2.4.3. Índice de sitio**

La productividad es un concepto biológico y no puede expresarse matemáticamente. Por ello, se ha optado por presentar la calidad de sitio a través de un valor o índice denominado índice de sitio e índice de productividad, ambos muy populares porque son una expresión cuantitativa de la calidad de sitio (Prodan, 1997). Normalmente el índice de sitio se expresa en forma de curvas y su empleo sirve para mostrar el desarrollo de la altura a una edad determinada o para determinar los índices de calidad de un sitio forestal (Vélez, citado por Chinchilla, 1989).

### **2.5. Curvas de índice de sitio**

Para la construcción de curvas de índice de sitio se han propuesto diferentes métodos para desarrollar funciones de sitio, los que varían según el principio aplicado, el tipo de datos, el método de construcción y el modelo empleado.

#### **2.5.1. Principio de anamorfismo**

Según Prodan (1997), durante muchos años, las curvas de índice de sitio se construyeron suponiendo que el desarrollo de la relación altura-edad para los diferentes sitios se daba con una tendencia constante, lo que se expresaba también en una proporcionalidad constante. De esta manera podemos afirmar que, la altura de un rodal en una cierta clase de sitio sería una proporción constante de la altura correspondiente a otras clases de

sitio independientemente de la edad; es decir que, según Scolforo (1993), existe una proporcionalidad del desenvolvimiento de las curvas que componen una familia de curvas. En este caso la inclinación de la curva, expresada por un coeficiente "x", es constante para todas las clases de sitio o sea la tasa de crecimiento relativo en altura es considerada constante para todos los sitios asumiéndose así que el crecimiento en altura entre las clases de sitio es proporcional.

### **2.5.2. Tipos de datos: Parcelas temporales**

Cuando se emplean parcelas temporales sólo puede adoptarse el principio del anamorfismo. Se debe tomar un número suficiente de mediciones para cubrir la gama de edades y sitios encontrados en condiciones naturales. Para relaciones eficaces son necesarias como mínimo 100 parcelas, aplicando el método convencional de la curva guía. Como no se conocen las relaciones altura-edad locales, éstas se estiman en base a la tendencia que muestran los puntos de muestreo. De la curva guía que representa a un sitio promedio se deriva proporcionalmente en dos sentidos el resto de las curvas específicas para las diferentes clases de sitio (Prodan, 1997). Cuando se emplean parcelas temporales, se asume que las diferentes clases de sitio están representadas en proporciones constantes para las diferentes clases de edad. De lo contrario, se produce un sesgamiento de la función de sitio resultante, excepto en el método de diferencias (Alder citado por Prodan, 1997).

### **2.5.3. Métodos construcción de curvas de índice de sitio**

Alder (1980), plantea que la construcción de curvas de índice de sitio puede hacerse por métodos gráficos o por métodos matemáticos.

#### **2.5.3.1. Construcción por métodos gráficos**

El procedimiento consiste en plotear todos los datos utilizando dos variables, la altura en el eje  $x_1$  y la edad en el eje  $x_2$  de la muestra poblacional arbórea de una especie. Los datos de las parcelas deben unirse por medio de líneas rectas; luego se trazan tres curvas a mano, dichas curvas deben seguir la tendencia de los datos de las parcelas del borde superior, del borde inferior y la tendencia central, (Alder, 1980).

Las curvas trazadas deben ser paralelas con máxima verosimilitud a la curva generada por los datos provenientes de las parcelas.

#### **2.5.3.2. Construcción por métodos matemáticos**

Según Prodan (1997), los principales métodos de construcción son:

- Método de la curva guía.
- Método de la ecuación de diferencia.
- Método de la regresión anidada.

Estos métodos tienen la ventaja del uso de hojas electrónicas si el número de datos es grande, además facilita obtener modelos estimativos y permite tener versatilidad en el manejo de la información. Sin embargo, no debe suponerse que los resultados obtenidos son más precisos que el trazado de curvas por métodos gráficos, pues esta precisión dependerá del modelo de crecimiento escogido y de la validez de las inferencias estadísticas usadas en el ajuste de los parámetros del modelo (Alder, 1980). Prodan (1997), nos muestra que el método de la curva guía ha sido el más usado para la construcción de funciones de índice de sitio representado por curvas anamórficas. A partir de una relación única para todos los datos de altura sobre edad se derivan el resto de funciones por el principio de proporcionalidad constante.

De manera general el primer paso es estimar el valor de los coeficientes a, b, c, y d del modelo mediante una regresión, para luego incorporarlo al mismo, con éste se construye la curva guía, posteriormente se aplica el método de intercepto o pendiente común, según sea el caso, para describir una familia de curvas de diferentes índices de sitio. Estos modelos permiten estimar el índice de sitio con base en una altura\* o estimar la altura con base en un índice de sitio (Hughell, 1990).

Cabe mencionar que con el avance de la ciencia y la tecnología, en especial de la informática, este método es el de mayor uso en la actualidad, ya que se tiene la ventaja de trabajar con una gran cantidad de

---

\* En este caso, el promedio de las alturas totales en metros de los tres árboles más altos por parcela.

información a alta velocidad y con un alto nivel de precisión, ésta puede ser seguramente almacenada y puede ser intercambiada y analizada por varios investigadores al mismo tiempo lo que facilita y mejora el trabajo, con la única desventaja de que a veces resulta muy costoso disponer de un buen sistema informático para realizar estos análisis estadísticos.

## **2.6. Estadígrafos empleados en el análisis de regresión**

El ajuste de modelos por mínimos cuadrados provee únicamente los parámetros obtenidos del ajuste de cada modelo, por esta razón para comparar los modelos ajustados es necesario realizar un análisis de regresión en el cual se contemplan diversos criterios estadísticos para la elección del modelo más adecuado entre los diversos modelos planteados, entre estos criterios podemos mencionar los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de correlación ( $R$ ) de las variables que estructuran el modelo y las pruebas estadísticas de distribución Fischer (Prueba F), la cual valora la capacidad de estimación de la regresión, es decir que el modelo ajustado a los datos sea válido para estimar los valores insesgados de la población con cierto grado de confiabilidad; y la prueba T-student, la cual valora la capacidad de estimación de la variable independiente de cada modelo (en este caso la edad). Además se realizan análisis del error que produce cada modelo, generando criterios tales como la desviación estándar de residuos ( $S$ ); y la descripción gráfica de dichos residuos, la cual permite juzgar visualmente la calidad de la regresión.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Ubicación y descripción general del sitio

La recopilación de datos para construir las curvas de índice de sitio se llevó a cabo en plantaciones puras de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en diversos sitios del área propiedad del Ingenio San Antonio (ISA). Parte de estas áreas eran usadas antiguamente como pastizales distribuidos irregularmente entre áreas de cultivos intensivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mientras que el resto era ocupado por residuos de bosques secos degradados y áreas de sabanas erosivas.

El área total que ocupaban las plantaciones al finalizar la etapa de campo (08 de Julio de 1999) era de 2,670 hectáreas, distribuidas en nueve bloques individuales con lotes de diferente extensión y el área evaluada consiste en 1,165 hectáreas correspondientes a cinco bloques del total plantado en ese momento (cuadro 1). La ubicación geográfica del Ingenio San Antonio puede referirse por la ubicación de su estación meteorológica, la cual se encuentra a los 13° 32' de latitud norte y 87° 03' de longitud oeste.

Las características climáticas de la zona (datos colectados de la estación meteorológica I.S.A., año 1995) son básicamente: Precipitación Media Anual (PMA) de 1880 mm, Temperatura Media Anual (TMA) de 28°C, Rango de altitud de 10 a 250 msnm, horas de iluminación solar (promedio anual) de 7.28 horas, Humedad Relativa (% promedio anual): 87.6%, Evaporación

Media Anual de 646 mm, y una Zona de Vida de Bosque Seco Tropical (INTECFOR, 1993).

### **3.2. Establecimiento del estudio**

#### **3.2.1. Descripción general de los sitios de muestreo**

Para realizar el estudio se seleccionaron 35 lotes de área plantada correspondientes a los bloques 1,2,4,5 y 6 con edades iguales o mayores a 2 años (cuadro 1), ya que se considera que a esta edad se obtienen diámetros y alturas que expresan productividad. En la figura 1 se aprecia la ubicación de los sitios evaluados.

#### **3.2.2. Levantamiento de información e instrumentos utilizados**

- a) Los datos se levantaron en parcelas temporales cuadradas de 10 x 10 metros distribuidas sistemáticamente se midió el DAP\* con cinta diamétrica y en centímetros como unidad básica de medición.
- b) La altura total de los árboles se midió en metros con el clinómetro suunto.
- c) En una hoja con formato especial se anotaron para cada árbol el DAP y altura total además de otras características del lote seleccionado como daños a los árboles y ataque de insectos.

---

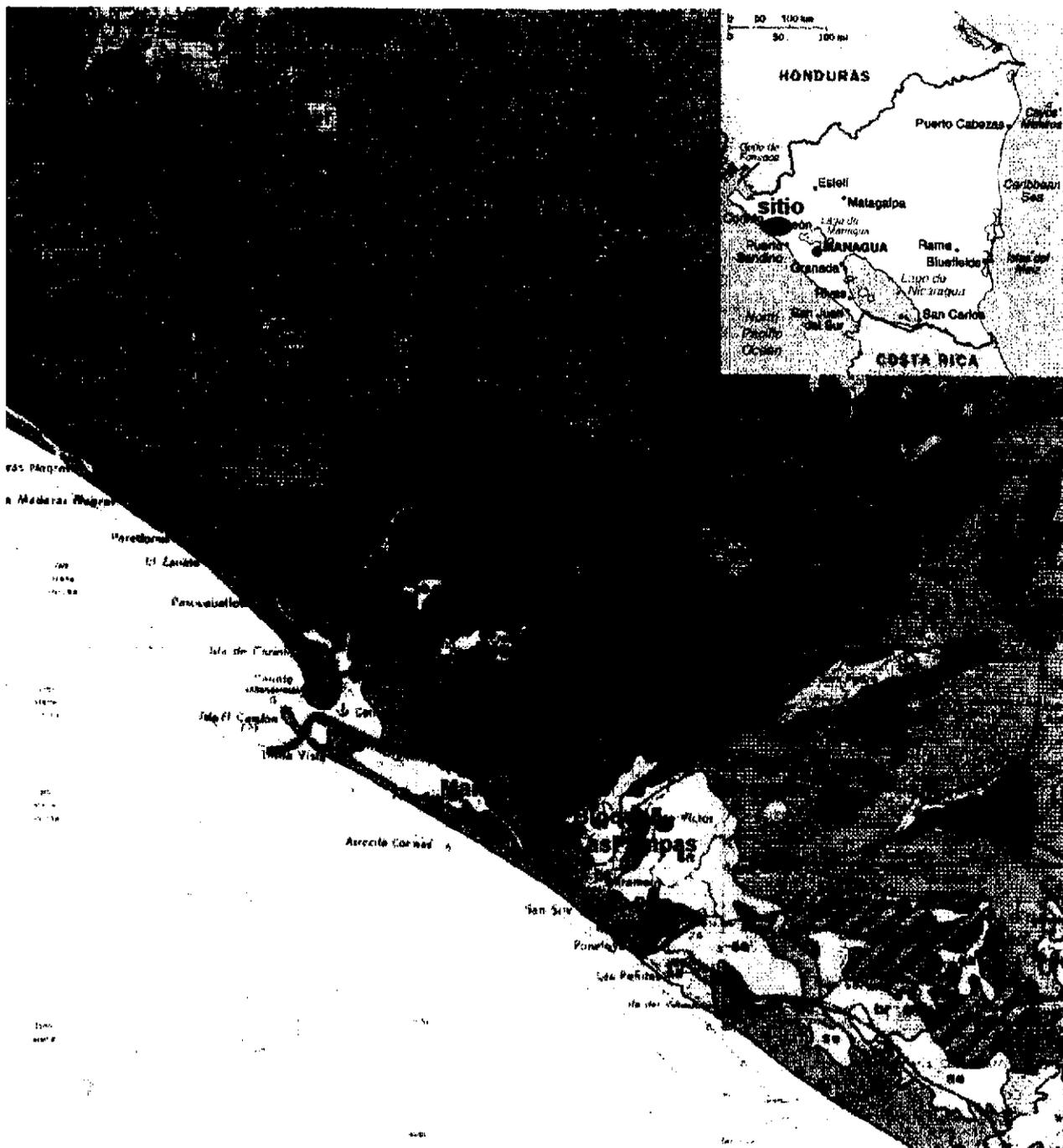
\* Diámetro a la altura de pecho

**CUADRO 1.** Características generales de lotes evaluados para la construcción de las curvas de índice de sitio.

Nombre del Lote	Cód. (bloque)	*Edad (años)	Area Neta (ha)	Cantidad (parcelas)
La Danta 96 (Los Chivos)	1	3	37.1	5
La Danta 95	1	4	71.5	17
La Danta 94 (las 2 mz)	1	5	1.6	3
La Danta 93 (las 5 mz)	1	6	5.8	3
Borrel del 94	1	5	14	5
La Danta del 97	1	2	32.7	9
Armenia del 94 (Armenia vieja)	2	5	48	13
Monochingo del 96 (parte buena)	2	3	58	8
Esparta del 95 (bloque de las 95)	2	4	65	16
Esparta del 94 (incluye la Chocolate)	2	5	84	20
Poza Bruja	2	6	48	13
Armenia Nueva del 95	2	4	38.6	12
Monochingo del 96 (el bajo)	2	3	20.7	7
Manchester del 94	4	5	29.3	9
El Muerto 2	4	6	14.6	4
Wascalan	4	4	43.5	12
El Mora y las 8 de Jesús María y la Campana	4	6	45.1	13
Jesús María del 95	4	4	36.2	10
El Jordán	4	6	18.4	5
El Muerto 1 y los Manchester PYF	4	4	9.5	2
Jesús María del 97	4	2	18	5
Pampas del 96 (frente a la pedrera)	5	3	33	6
Las Pampas del 96 (cuadro de la policía)	5	3	51.4	13
Las Pampas del 95 (cuadro enfrente de la policía)	5	4	24.6	9
Las 76 de las Pampas del 96	5	3	53.4	14
Providencia	5	6	18.5	6
Las pampas del 95 (lote viejo en la pedrera)	5	4	82.2	22
Las Pampas del 97	5	2	24.2	7
Miravalle del 95	6	4	43	11
Toro Pinto del 94	6	5	31.6	9
Miravalle viejo	6	6	17.7	5
El Deseo	6	5	5	3
Toro Pinto del 97	6	2	10.6	3
Miravalle del 97 las 29 mz	6	2	20.7	6
Miravalle 97 El Establo fte. Ensayo	6	2	9.5	2
<b>Total</b>			<b>1165</b>	<b>307</b>

\*Edad de los árboles a la fecha de muestreo.

Figura 1. Mapa de Ubicación de Zonas de Muestreo



(Fragmento de Mapa de Uso de la Tierra con escala 1:250,000 en esta grafica, sin escala. Mapa de Nicaragua sin Escala)

### 3.2.3. Planteamiento de modelos

Se probaron once modelos matemáticos distintos para construir las curvas de índice de sitio.

- 1-  $\ln H = a + b/E$  (Schumacher)\*
- 2-  $\ln H = a + b \ln E + c (\ln E)^2$
- 3-  $\ln H = a - b/E - b/E^2$
- 4-  $\ln H = a + b/E^2$
- 5-  $\ln H = a + bE$
- 6-  $\ln H = a + bE^{0.5}$
- 7-  $\ln H = a + b \log E$
- 8-  $\ln H = a + b/E + c/E^2 + d/E^3$
- 9-  $\ln H = a + b/E^2 + c + 1/E^3$
- 10-  $\ln H = a - b/E$
- 11-  $E^2/H = a + bE + cE^2$  (No logarítmico)

Donde:

$\log$  = logaritmo base 10

$\ln$  = logaritmo natural

$H$  = promedio de las alturas de los 3 árboles más altos por parcela en m.

$E$  = edad en años

$a, b, c, d$  = coeficientes de ajuste

---

\* Modelo empleado por Hughell, (1990), para la predicción del crecimiento y rendimiento de cuatro especies arbóreas en Centroamérica, citado en la bibliografía.

### 3.2.4. Estadígrafos y estadísticos empleados para el análisis de los modelos seleccionados

Los modelos presentados se evaluaron a través del análisis de regresión, dentro de este análisis se calcularon los parámetros (a, b, c, y d) para cada modelo.

Los estadígrafos más importantes como son el coeficiente de correlación (R), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la desviación estándar residual (S), los estadísticos de la distribución T-student (para indicar el aporte o valor de la variable independiente a cada modelo) y los estadísticos de la distribución F (para indicar la calidad de la regresión de cada modelo); fueron calculados a través de las fórmulas siguientes:

$$R^2 = SCR/SCT \quad (01)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (02)$$

$$S = \sqrt{CME} \quad (03)$$

$$F = CMR/CME, F \text{ tabulado con gl.} = m, n-m-1 \quad (04)$$

$$T = [\bar{x} - \mu]/[S/\sqrt{n}], T \text{ tabulado con gl.} = n-m-1 \quad (05)$$

Donde:

$$SCT = SCR + SCE$$

$$CMR = SCR/m$$

$$CME = SCE/n-m-1$$

SCT = suma total de cuadrados

SCE = suma de cuadrados del error

SCR = suma de cuadrados de la regresión

CMR = cuadrado medio de la regresión

CME = cuadrado medio del error

$R^2$  = coeficiente de correlación

R = coeficiente de determinación

S = desviación estándar residual

F = valor calculado para la prueba de Fischer

T = valor calculado para la prueba de T- student

m = número de variables predictoras (edad)

n = tamaño de la muestra (número total de observaciones)

### **3.3. Manejo de datos y procesamiento de la información**

El manejo de los datos obtenidos, procedimientos y los programas de computación empleados se sintetizan de la forma siguiente:

- a) Se creó un archivo maestro en el programa Excel 5.0 (hoja de cálculo de Microsoft Office, para Windows ), con los datos obtenidos (número de árboles, DAP, altura total).
- b) Se calculó el promedio de las alturas de los tres árboles más altos por parcela a través de Excel a partir del archivo maestro de datos.
- c) Con estos datos se realizó el ajuste por mínimos cuadrados para once modelos en el programa estadístico SPSS (Statistical Package For Social Science) versión 6.1 para

Windows, tomando como variable dependiente el promedio de las alturas de los tres árboles más altos por parcela como variable independiente la edad de la parcela.

Cabe mencionar que el tamaño de la muestra de las alturas promedio fue de 307 unidades. Este tamaño de muestra fue analizado y ajustado conforme los criterios que tiene diseñado la teoría del muestreo, eliminando de esta forma aquellos que presentaban un crecimiento atípico al patrón de crecimiento del resto de datos muestrales. El resultado de este ajuste fue un grupo de 231 unidades de muestreo que fueron utilizadas posteriormente, para el análisis de regresión y el ajuste por mínimos cuadrados.

Los análisis generales para determinar el mejor modelo del grupo fueron: El análisis de varianza (ANDEVA) de la regresión, el análisis de la regresión (parágrafos 1, 2, 3, 4, 5), y el análisis estadístico y gráfico de residuales.

### **3.4. Construcción de las curvas de índice de sitio**

Para la construcción de las curvas de índice de sitio se fijó una edad base en cinco años, ya que se considera que el turno de rotación de la especie oscila alrededor de seis años aproximadamente, con el modelo seleccionado para calcular el índice de sitio en la zona se calcularon la curva de índice de sitio promedio y la familia de curvas de índice de sitio; en este caso se utilizó el método de pendiente común donde el intercepto "a"

depende del índice de sitio seleccionado a la edad base, “a” se despeja del modelo y se calcula para los diferentes índices de sitio, asumiendo que  $\ln H = \ln IS$ .

Una vez calculado el intercepto “a” para el índice de sitio a la edad base, se procede a calcular las diferentes curvas de índices de sitio, graficando la edad de la parcela contra cada altura estimada por el modelo. Para comparar las curvas de índices de sitio, se seleccionan los valores encontrados a la edad base de 5 años en las curvas y se calcula la diferencia entre éstos, si esta diferencia no excede de un metro, la variación de proporcionalidad entre las curvas no es grande.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Ajuste de modelos y estadísticos obtenidos**

#### **4.1.1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ )**

El coeficiente de determinación que mostró el valor más alto fue el obtenido por el modelo once (anexo 1) con un valor  $R^2 = 89.86\%$ ; en segundo lugar el modelo número ocho, el cual presentó un valor  $R^2 = 87.84\%$ , siendo el modelo cuatro el de menor valor para el coeficiente de determinación  $R^2 = 81.58\%$ .

#### **4.1.2. Coeficiente de correlación (R)**

Los valores más altos obtenidos en el análisis de los modelos fueron alcanzados por el modelo once con un valor  $R = 80.76\%$  y el modelo ocho con un valor  $R = 77.29\%$  y el modelo cuatro, el cual obtuvo el valor más bajo  $R = 66.55\%$ . Los valores de los parámetros (a, b, c y d) de cada modelo pueden apreciarse en el anexo 1.

#### **4.1.3. Desviación estándar residual (S)**

La desviación estándar residual más baja fue obtenida por el modelo ocho, el cual presentó un valor  $S = 15.25\%$  seguido por el modelo dos, con un valor  $S = 15.26\%$ . El valor más alto lo presentó el modelo once, con un valor  $S = 23.63\%$ .

#### **4.1.4. Estadísticos de distribución F y T – student**

Se les aplicó una prueba T a los once modelos para determinar si el aporte de la variable independiente (Edad) fue o no significativo. El resultado de esta prueba fue que se obtuvo un valor de  $T_c = 2$  a un nivel de confianza del 95% (anexo 1) lo que significó que la variable edad de cada modelo sí aportó algún efecto al modelo, del mismo modo la prueba F del ANDEVA mostró que las regresiones generadas por los once modelos fueron significativas presentando valores  $F_c \geq 2425.37$ .

#### **4.2. Elección del modelo**

En los once modelos planteados los valores obtenidos para la prueba T-student son significativos a un nivel del 95% de confianza ( $T_c=2$ ), además en el análisis de varianza (ANDEVA), el valor F calculado para ambas regresiones es superior al valor  $F_c$  tabulado a un nivel del 95% de confianza estadística, lo que indicó que el aporte de las variables fue significativo en los once modelos planteados convirtiéndose en un criterio de poca utilidad para la comparación de modelos, de modo que los principales criterios estadísticos para la selección del mejor modelo fueron los coeficientes de correlación (R) y de determinación ( $R^2$ ), la desviación estándar residual y la distribución gráfica residual para cada modelo como se puede apreciar en los anexos 1 y 2 respectivamente, los modelos once, ocho y dos presentan valores R y  $R^2$  más altos. La desviación estándar residual (S) representó valores más bajos para los modelos ocho y dos así como también

la distribución gráfica de los residuales, está uniformemente distribuida para cada edad lo que indica una distribución del error aceptable estadísticamente.

Los resultados anteriores apoyan la idea de que los modelos transformados por la aplicación de logaritmos naturales estiman con mayor precisión la altura de los árboles y son los más convenientes para la construcción de curvas de índice de sitio. Esta afirmación es congruente con resultados alcanzados en estudios previos por Hughell (1990) y Fonseca (1986) quienes comprobaron esta afirmación.

El modelo elegido fue el número ocho en el orden descendente de la tabla de resúmenes de ajuste (anexo 1):  $\ln H = a + b/E + c/E^2 + d/E^3$ , por ser este el que representa fielmente el desarrollo de la especie sin ser inflexible a la intervención de fenómenos biológicos en su desarrollo, lo cual es apreciable en el gráfico generado por el ajuste del modelo (figura 2). Además de reflejar en su recorrido la forma sigmoideal del desarrollo de la vida de las poblaciones de especies.

#### **4.3. Construcción de las curvas de índice de sitio**

Para construir la familia de curvas de índice de sitio se siguió la metodología de pendiente común en la cual el intercepto del modelo propuesto cambia según el índice de sitio.

El primer paso es construir una curva promedio de índice de sitio para la zona de estudio con los datos de la muestra ajustada utilizando para esto el modelo elegido que ajustado resulta:  $\ln H = 2.5576 + 6.2283 / E - 37.4239 / E^2 + 44.5599/E^3$  (modelo 8).

Entonces a una edad base de 5 años el cálculo es el siguiente:

$$\ln H = 2.5576 + 6.2283/5 - 37.4239/25 + 44.5599/125$$

$$\ln H = 2.5576 + 1.24566 - 1.496956 + 0.3564792$$

$$H = e^{(2.6627832)}$$

$$H = 14.33613395$$

Este dato expresa el valor de la altura en la curva promedio en el intercepto de 5 años.

Para todas las edades el cálculo que resulto fue el siguiente:

E	E <sup>2</sup>	E <sup>3</sup>	mod8
2	4	8	6.591378452
3	9	27	8.380064032
4	16	64	11.84528251
5	25	125	14.33613395
6	36	216	15.83769813

Posteriormente se calcula la familia de curvas a partir de la curva promedio, se calcularon las derivadas inferiores y superiores que representan cada índice de sitio, despejando el coeficiente "a" del modelo seleccionado y sustituyendo el valor de los índices de sitio propuestos que incluyen una amplitud de 2 metros dentro de un

intervalo de 10 a 18 metros de altura con el objetivo de abarcar la variabilidad de las mediciones e involucrar de esta forma todo el rango posible de crecimiento para obtener resultado más exacto que proporcionen información verdaderamente valiosa para la planificación de la producción.

Entonces tenemos:

Coefficiente "a"

$$\ln H = \ln IS$$

$$\ln H = \ln 10$$

$$\ln 10 = a + 1.24566 - 1.496956 + 0.3564792$$

$$a = \ln 10 - 1.24566 + 1.496956 - 0.3564792$$

$$a = 2.302585093 - 1.24566 + 1.496956 - 0.3564792$$

$$a = 2.1974$$

Para calcular el IS10 a 5 años se sustituye el valor de "a" en la ecuación y nos resulta:

$$\ln H = a + 6.2283/5 - 37.4239/25 + 44.5599/125$$

$$\ln H = 2.1974 + 6.2283/5 - 37.4239/25 + 44.5599/125$$

$$\ln H = 2.1974 + 1.24566 - 1.496956 + 0.3564792$$

$$H = e^{(2.3025832)} = 9.99$$

$H = 10$ , este valor representa la altura promedio de la población arbórea en el intercepto de 5 años.

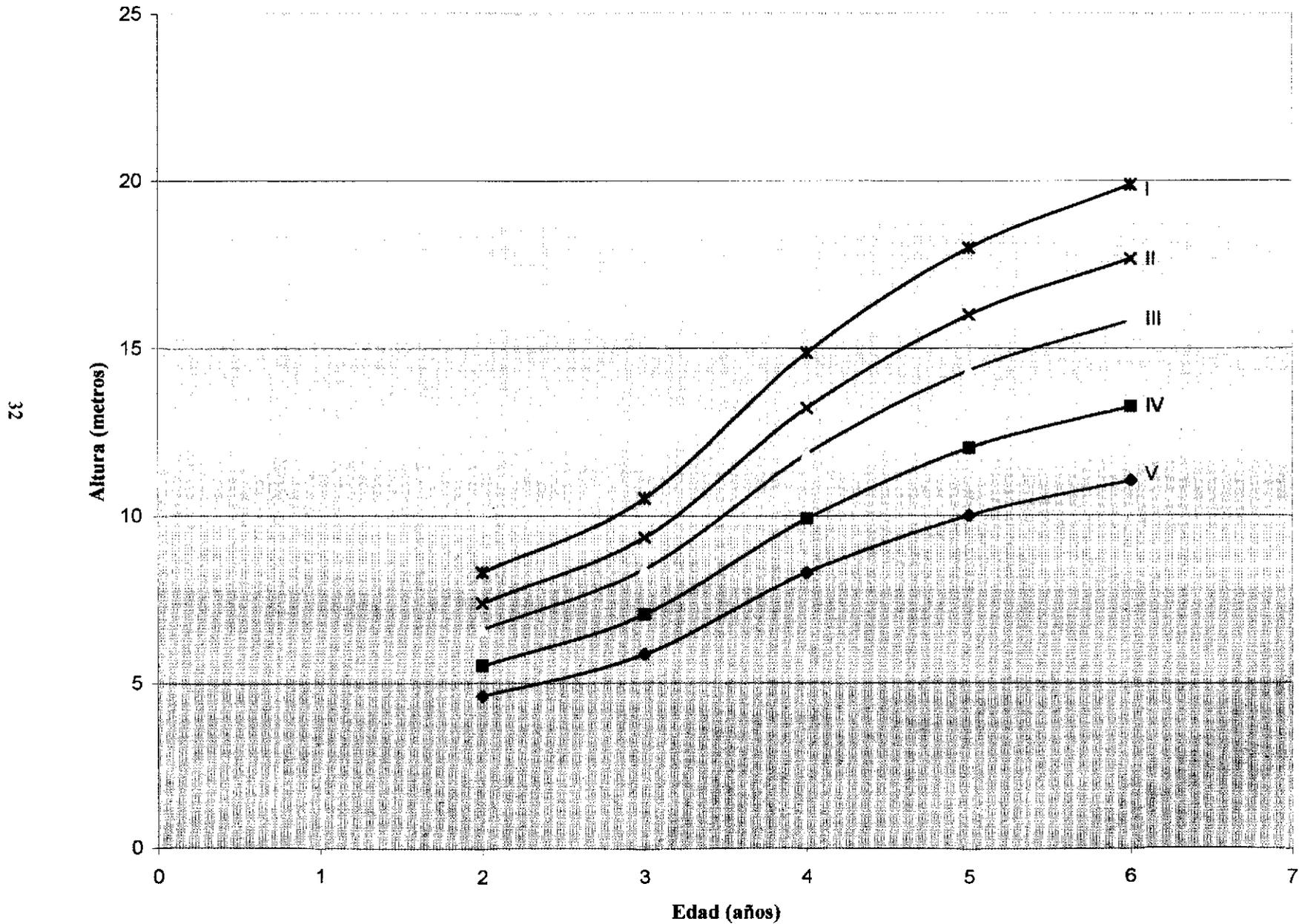
Posteriormente se calculan las alturas para el resto de edades (2, 3, 4, 6 años), con el mismo coeficiente "a" = 2.1974

El valor del coeficiente “a” para el resto de índices de sitio será:

IS	“a”
12	2.3794
14	2.5576
16	2.6674
18	2.7852

A partir de estos valores se construye la familia de curvas de la zona de estudio.

**Figura 2. Familia de Curvas de Índice de Sitio Para  
*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.**



## **4.4. Discusiones**

### **4.4.1. Gráfico**

Las curvas presentadas abarcan edades desde los dos hasta los seis años y el rango de altura a la edad base se ubica entre los diez y dieciocho metros.

De conformidad con el análisis se podría afirmar que los primeros tres años de desarrollo marcan el establecimiento y adaptación de la especie a las condiciones ambientales imperantes en la zona de estudio, además de la competencia con otras especies por agua, luz, nutrientes y espacio, así como el ataque de insectos tales como zompopos (*Atta Sp.*), se aprecia que el desarrollo biológico se acentúa a partir de esta edad en menor o mayor intensidad en dependencia de las condiciones agro-ecológicas necesarias que influyen directamente en las variables de estado como la edad y la altura.

### **4.4.2. Teoría sobre la calidad de estación**

En general se pueden agrupar estas curvas en cinco tipos de calidad de sitio:

Índice de sitio alto = Calidad de sitio I

Índice de sitio bueno = Calidad de sitio II

Índice de sitio medio = Calidad de sitio III

Índice de sitio regular = Calidad de sitio IV

Índice de sitio bajo = Calidad de sitio V

Entonces tenemos:

Índice de sitio	Calidad de sitio
18	I
16	II
14	III
12	IV
10	V

Con esta información es posible identificar aquellos sitios que poseen el mejor potencial para el crecimiento de los árboles; así es posible maximizar la potencialidad del sitio al planificar el aprovechamiento forestal.

## V. CONCLUSIONES

1.  $\ln H = a + b/E + c/E^2 + d/E^3$  obtuvo el mejor ajuste para la construcción de curvas anamórficas de índice de sitio después de obtener buenos resultados en el análisis de regresión, una distribución uniforme en el gráfico de residuales, ser fácil de manipular y ser flexible en su gráfico a fenómenos ambientales y biológicos. El modelo ajustado se expresa de la siguiente forma:  $\ln H = 2.5576 + 6.2283/E - 37.4239/E^2 + 44.5599/E^3$ .

2. Los índices de sitios generados se pueden agrupar en cinco tipos de calidades:

Calidad de sitio I : IS18

Calidad de sitio II : IS16

Calidad de sitio III : IS14

Calidad de sitio IV : IS12

Calidad de sitio V : IS10

3. Los modelos transformados mediante la aplicación de logaritmos naturales estiman con mayor precisión la altura de *E. camaldulensis* Dehnh; con respecto a la edad debido a que los valores de ajuste de regresión y distribución de residuales son superiores a los valores generados por el modelo no transformado.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Es importante establecer una red de parcelas permanentes que permitan realizar estudios detallados sobre índice de sitio y de volumen, además para poder contar con un banco de información de inventarios sucesivos.
2. Se sugiere que en investigaciones futuras se incorporen a la base de datos nuevas mediciones con el objetivo de validar las curvas y reajustar los coeficientes del modelo elegido.
3. Se recomienda que la aplicación de criterios como los coeficientes de correlación ( $R$ ) y de determinación ( $R^2$ ), así como los análisis gráficos y estadísticos de los residuales generados por los modelos de regresión sea básica e indispensable en el proceso de selección de modelos de estimación de índice de sitio.
4. Es conveniente que el uso del gráfico de las curvas de índice de sitio de este trabajo se limite en su aplicación a la zona de estudio; fuera de este rango debe ser usado acompañado de las experiencias de expertos para el balance de proporcionalidad.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. FAO: Montes N°. 22, Vol. 2. 80p.
  
- CATIE. 1986. Silvicultura de especie promisoría para producción de leña en América Central: Resultado de 5 años de investigación. CATIE. Dpto. de Recursos Renovables. Serie técnica. Informe técnico N° 86. Turrialba, Costa Rica 1986.
  
- CHINCHILLA, ORLANDO. 1989. Curvas de Índice de Sitio para *Cupressus lusitanica*, en la zona de distribución artificial de Costa Rica. Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales. Heredia Costa Rica. 73p.
  
- ECOT – PAF/IRENA. 1992. Plan de Acción Forestal. Documento Base. Managua, Nicaragua. 90p.
  
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. COLECCION FAO: Montes N° 11.
  
- FONSECA G, W. 1986. Curvas de Índice de Sitio para *Alnus acuminata* H.B.K. en la zona de distribución natural en Costa Rica. Tesis de Licenciatura Forestal. Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales de Heredia, Costa Rica. 74p.

- HUGHELL, D. 1990. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricida sepium*, *Guazuma ulmifolia*, y *Leucaena leucocephala* en América Central. CATIE. Serie técnica. Boletín técnico N° 22. 57p.
- INTECFOR 1993. Manual Técnico Forestal. 1era. ed. INTECFOR, IRENA, UNA, INATEC, Managua, Nicaragua.
- LAMPRECHT, H. 1990. Silvicultura en los trópicos. 1era. ed. en español. GTZ.
- LUQUE, R. 1981. Clasificación preliminar de la calidad de sitio para plantaciones jóvenes de Teca (*Tectona grandis*), en la Unidad I de la Reserva Forestal de Caparo. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Mérida, Venezuela. 24p.
- MENDEHALL, W.; SCHEAFFER, R.L.1986. Estadística Matemática con Aplicaciones. 1era. ed. en español. edit. Iberoamérica. México D.F., México.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P.1997. Mensura Forestal, serie investigación y educación en desarrollo sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre agricultura, recursos naturales y desarrollo sostenible.
- SCOLFORO, JOSE ROBERTO S. 1993. Mensuración Forestal. Módulo 4. Evaluación de la productividad forestal a través de la clasificación de sitio. LAVRAS. ESAL/FAEPE. 138p.

- VINCENT, L.1975. Manejo de plantaciones forestales fines de producción. Mérida, Venezuela, Departamento de Manejo de Bosque, Centro de Estudio de Postgrados, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes. 151p.
  
- ZEPEDA, B.; MARCELO E. y RIVERO, B. PIOQUINTO. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio: Ejemplificación de métodos de la curva guía. CIENCIA FORESTAL. Revista del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF). Coyoacán, México, D.F. 9 (51): 3 – 38.

## **VIII. ANEXOS**

## ANEXO 1. RESUMEN DE AJUSTE DE MODELOS Y CRITERIOS DE SELECCIÓN

Nº	Modelo	Modelo Ajustado	R%	R <sup>2</sup> %	S%	Pruebas Estadísticas			
						F <sub>c</sub>	F	T <sub>c</sub>	T
1	$\ln H = a + b/E$	$\ln H = 3.1784 - 2.7693/E$	85.41	72.96	16.57	25180.84	3.84	2.00	1.64
2	$\ln H = a + b \ln E + c (\ln E)^2$	$\ln H = 1.1474 - 1587.7342 \ln E + 794.3324 (\ln E)^2$	87.84	77.16	15.26	19806.93	3.00	2.00	1.64
3	$\ln H = a - b/E - b/E^2$	$\ln H = 3.0057 - 1.6312/E - 1.6312/E^2$	84.1	70.73	17.27	15442.52	3.00	2.00	1.64
4	$\ln H = a + b/E^2$	$\ln H = 2.7534 - 3.9108/E^2$	81.58	66.55	18.46	13499.88	3.84	2.00	1.64
5	$\ln H = a + bE$	$\ln H = 1.4915 + 2286E$	85.47	73.05	16.57	16775.27	3.84	2.00	1.64
6	$\ln H = a + bE^{0.5}$	$\ln H = .6218 + 9027E^{0.5}$	86.64	75.07	15.94	18140.89	3.84	2.00	1.64
7	$\ln H = a + b \log E$	$\ln H = 1.2589 + 1.9763 \log E$	87.02	75.74	15.72	18641.59	3.84	2.00	1.64
*8	$\ln H = a + b/E + c/E^2 + d/E^3$	$\ln H = 2.5576 + 6.2283/E - 37.4239/E^2 + 44.5599/E^3$	87.91	77.29	15.25	14874.67	2.60	2.00	1.64
9	$\ln H = a + b/E^2 + c + 1/E^3$	$\ln H = 51.5775 - 4.4586/E^2 - 48.8075 + 1/E^3$	82.11	67.43	18.26	10354.06	3.00	2.00	1.64
10	$\ln H = a - b/E$	$\ln H = 3.1784 - 2.7693/E$	85.41	72.96	16.64	12481.33	3.84	2.00	1.64
11	$E^2/H = a + bE + cE^2$	$E^2/H = .2073 + 1.1806E + 0.0275E^2$	89.86	80.76	23.63	2425.37	3.00	2.00	1.64

Donde:  $\ln$  = logaritmo natural;  $H$  = promedio de las alturas de los 3 árboles más altos por parcela en m.;  $E$  = edad en años;  $\log$  = logaritmo base 10.

$a, b, c, d$  = coeficientes de ajuste

$R$  = coeficiente de correlación

$R^2$  = coeficiente de determinación

$S$  = desviación estándar residual

$F_c$  = valor F calculado por el ajuste del modelo

$F$  = valor F tabulado al 95% de confianza

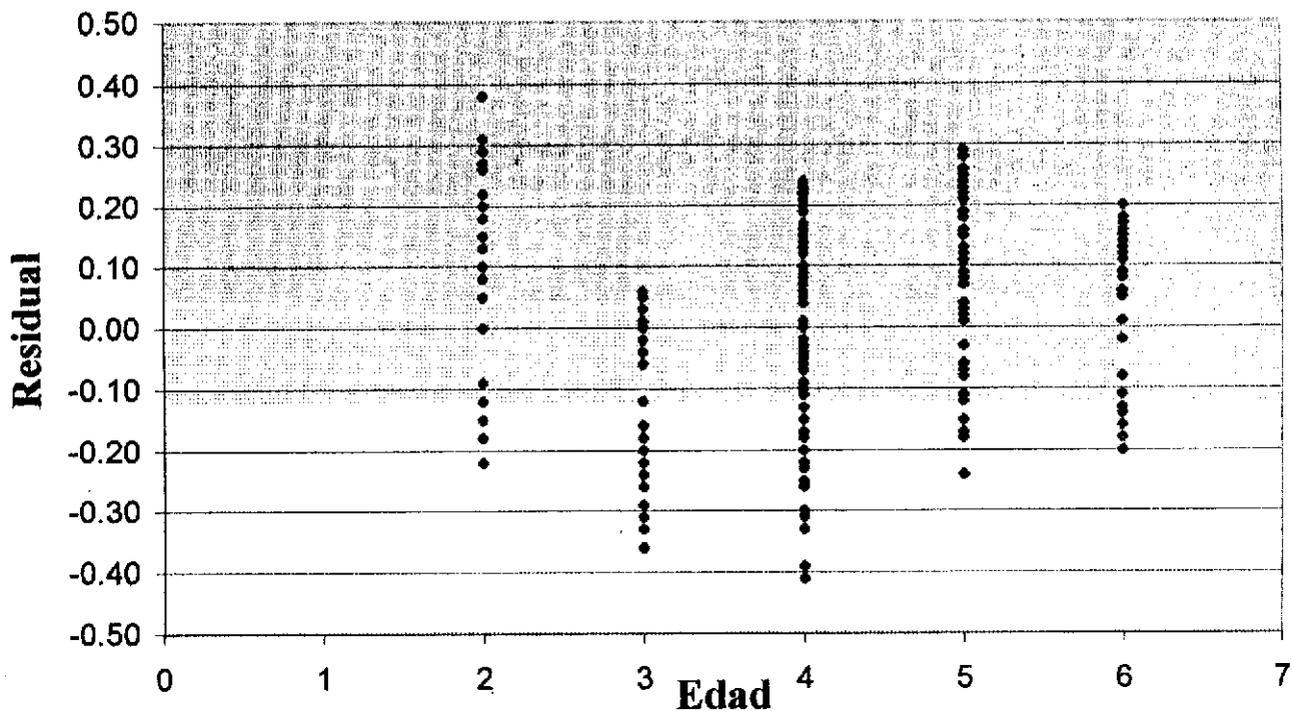
$T_c$  = valor T calculado por el ajuste del modelo

$T$  = valor T tabulado al 95% de confianza

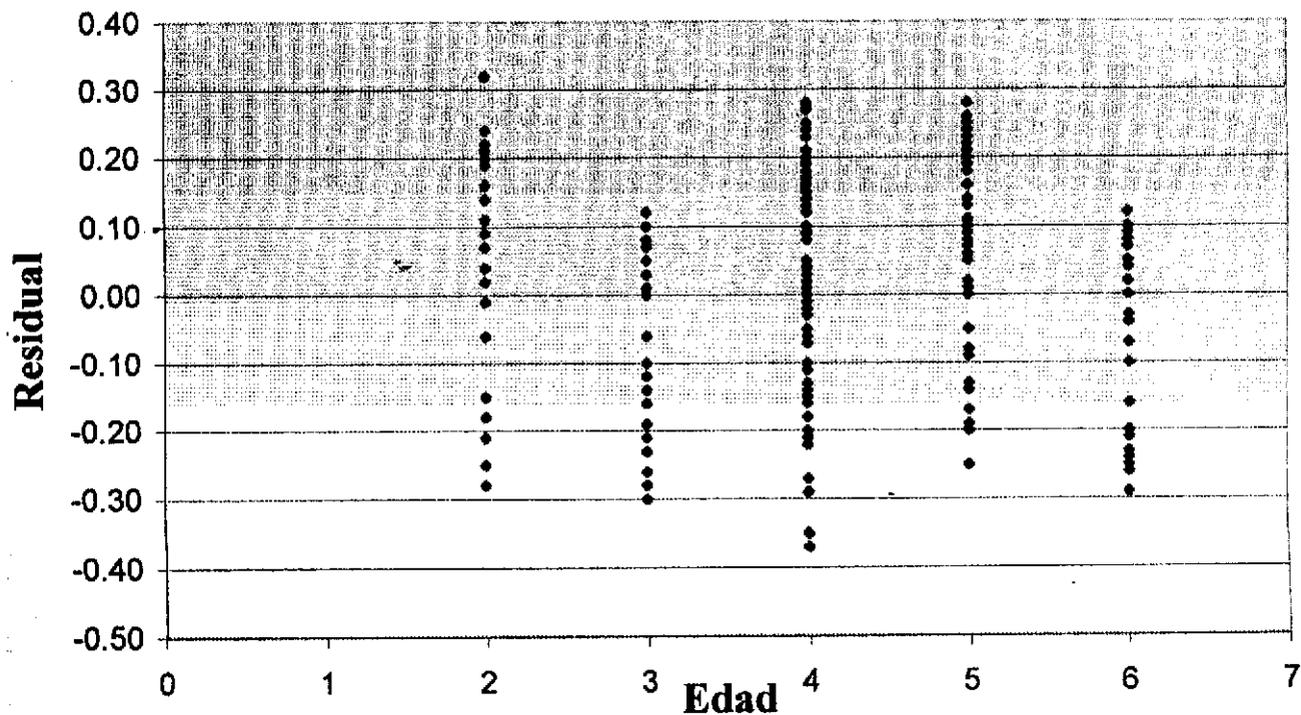
\* = modelo escogido

## ANEXO 2. ANÁLISIS GRÁFICO RESIDUAL DE MODELOS AJUSTADOS

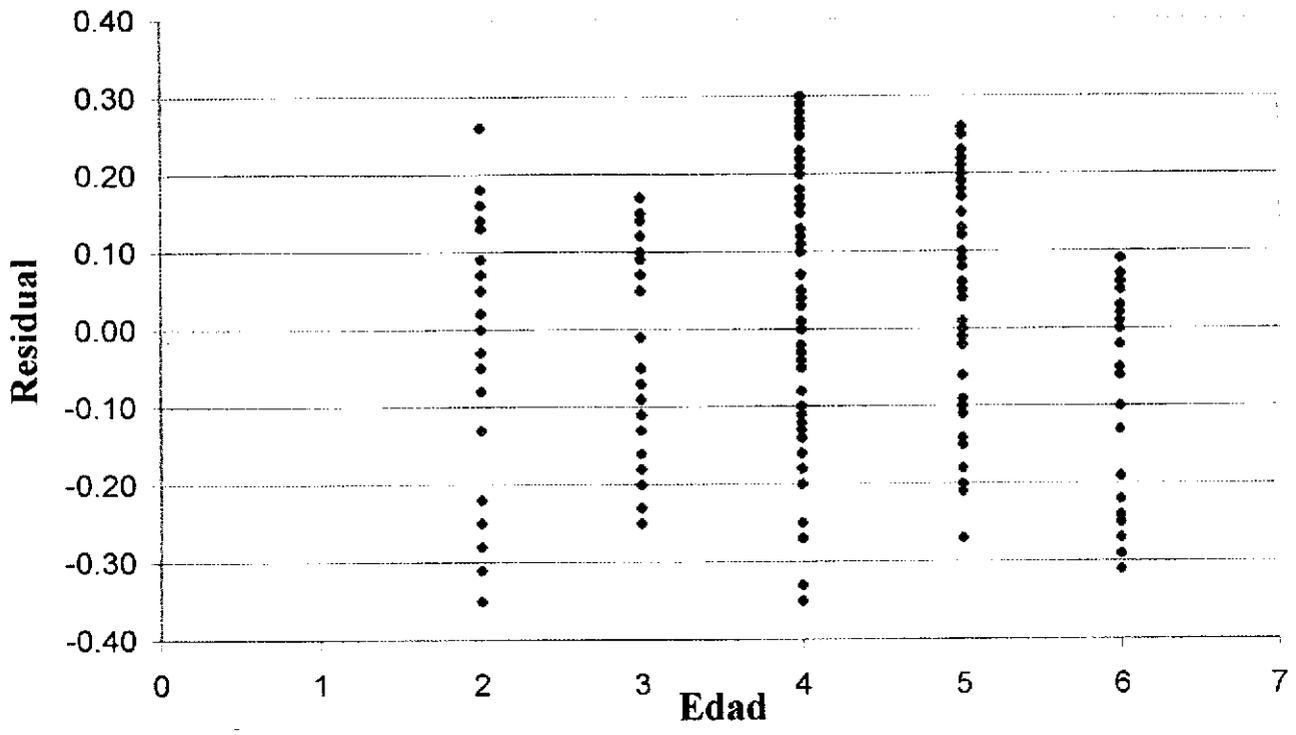
Residuales Versus Edad. Modelo 1  
(residuales de ALTURA)



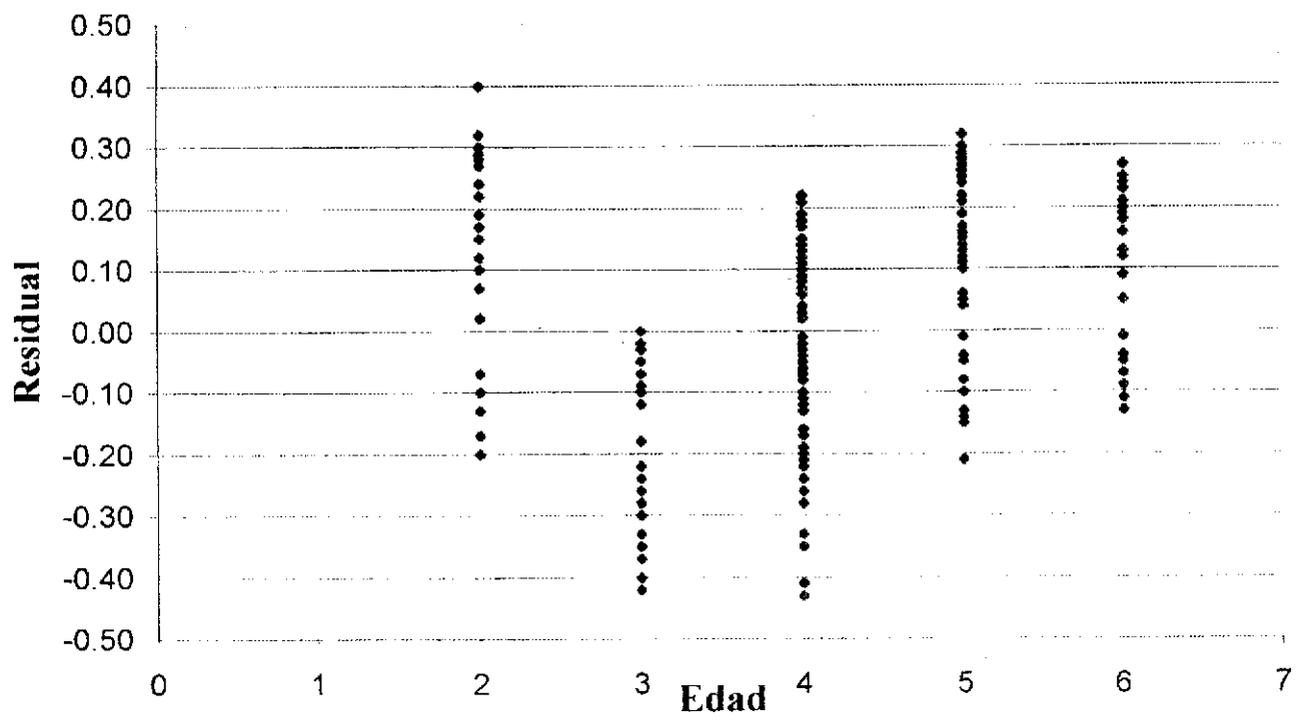
Residuales Versus Edad. Modelo 2  
(residuales de ALTURA)



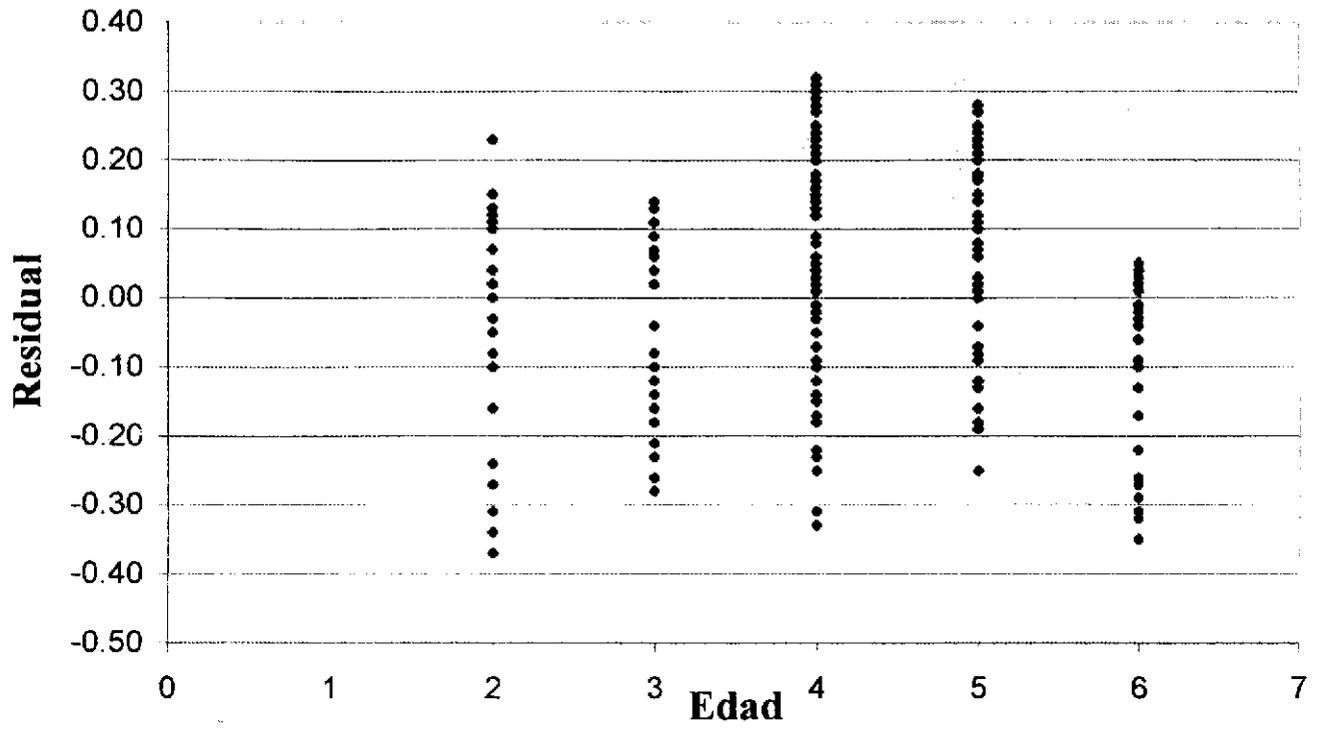
Residuales Versus Edad. Modelo 3  
(residuales de ALTURA)



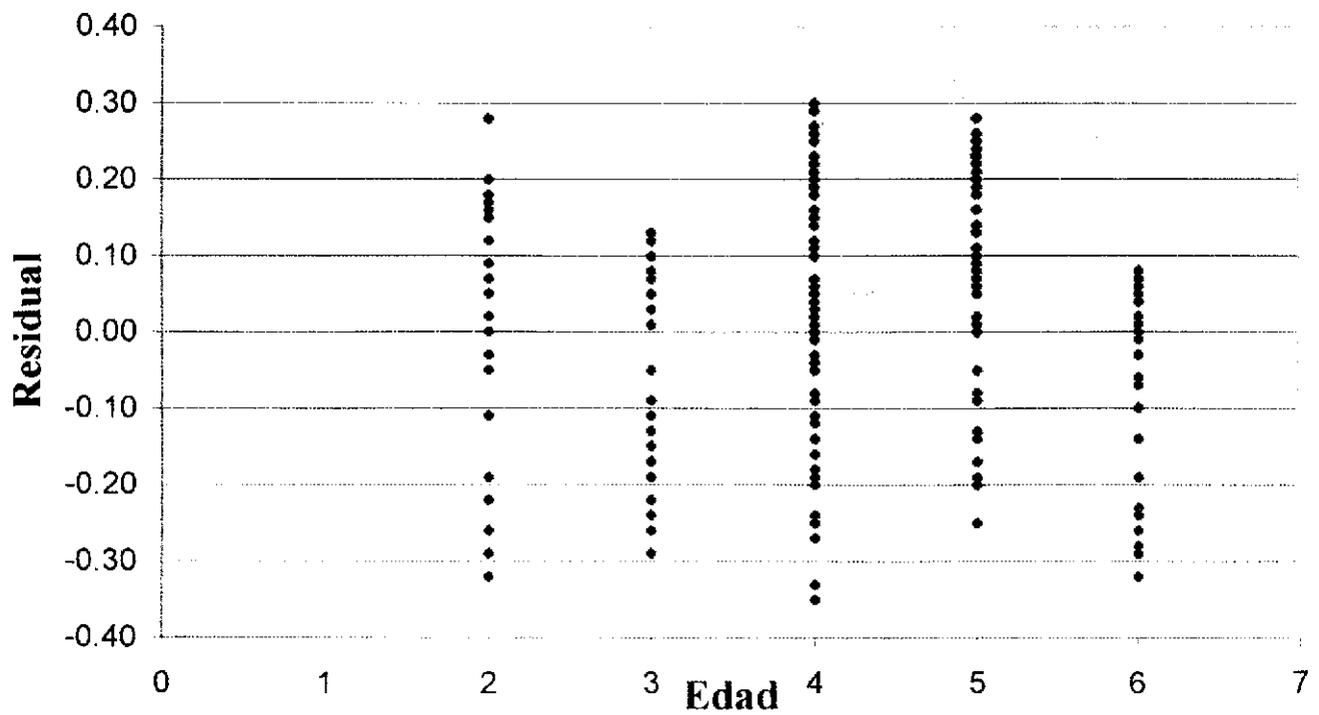
Residuales Versus Edad. Modelo 4  
(residuales de ALTURA)



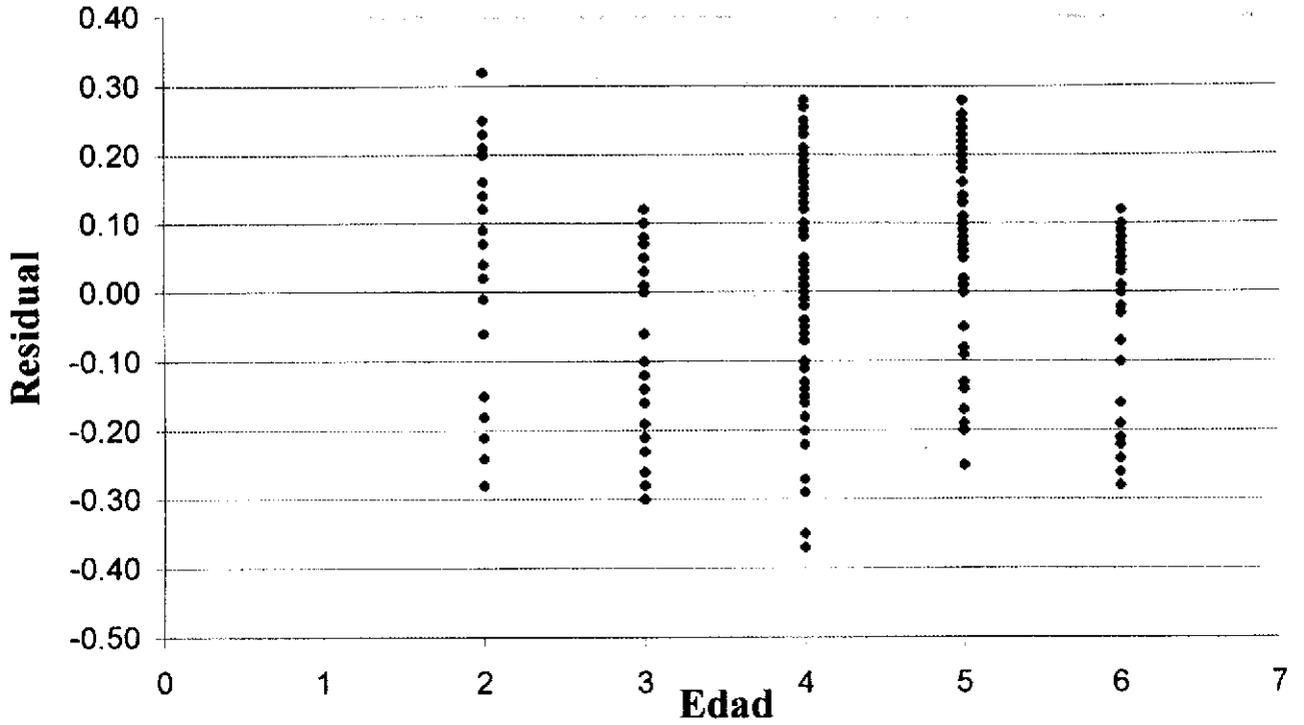
Residuales Versus Edad. Modelo 5  
(residuales de ALTURA)



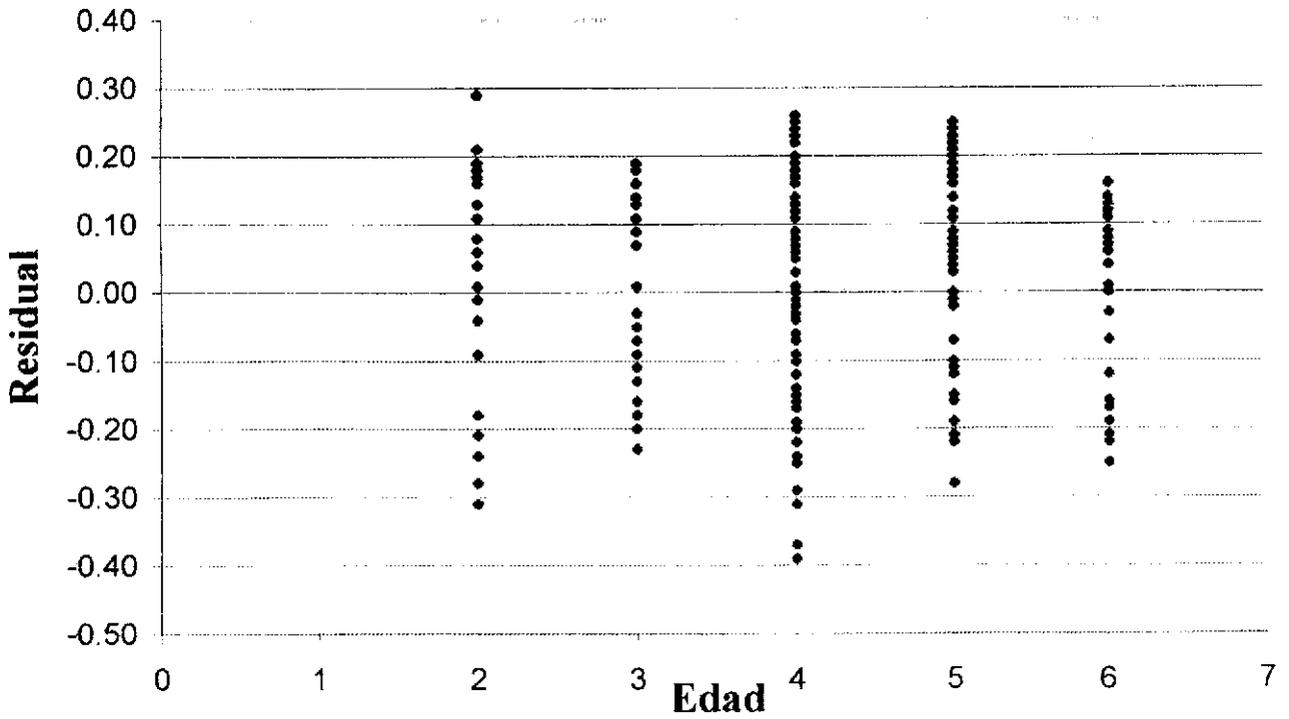
Residuales Versus Edad. Modelo 6  
(residuales de ALTURA)



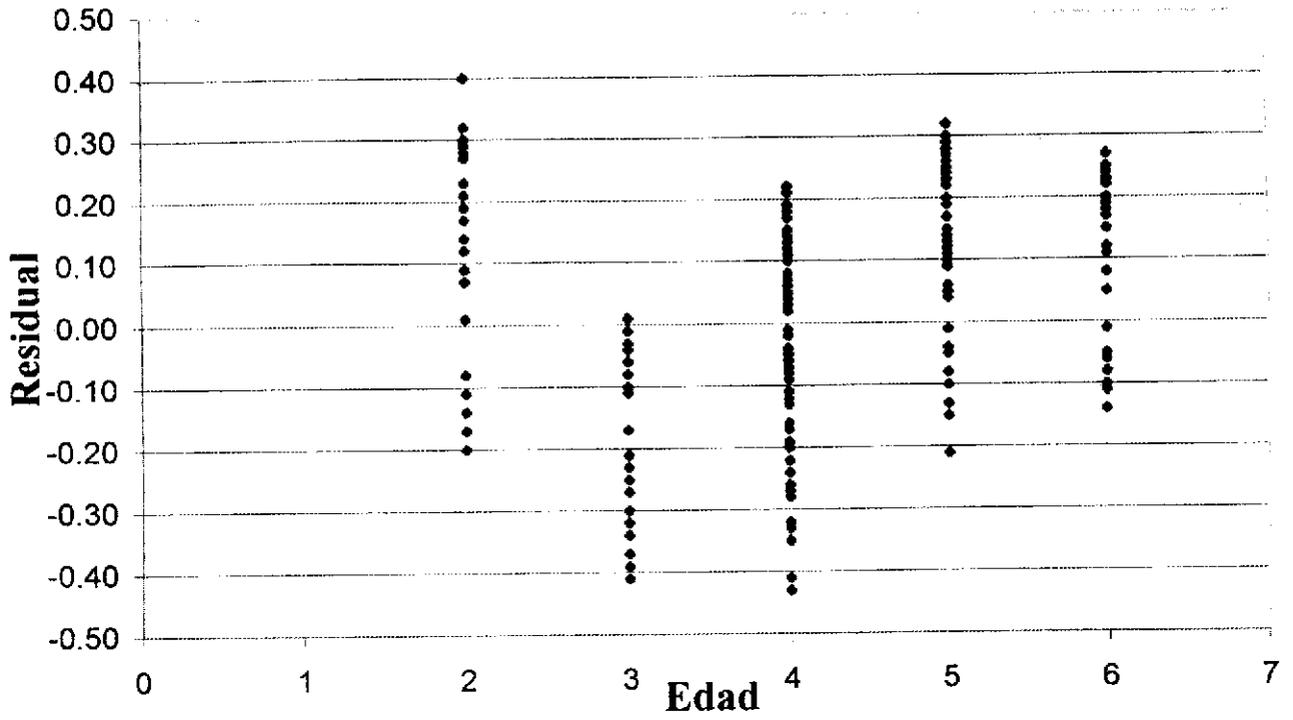
Residuales Versus Edad. Modelo 7  
(residuales de ALTURA)



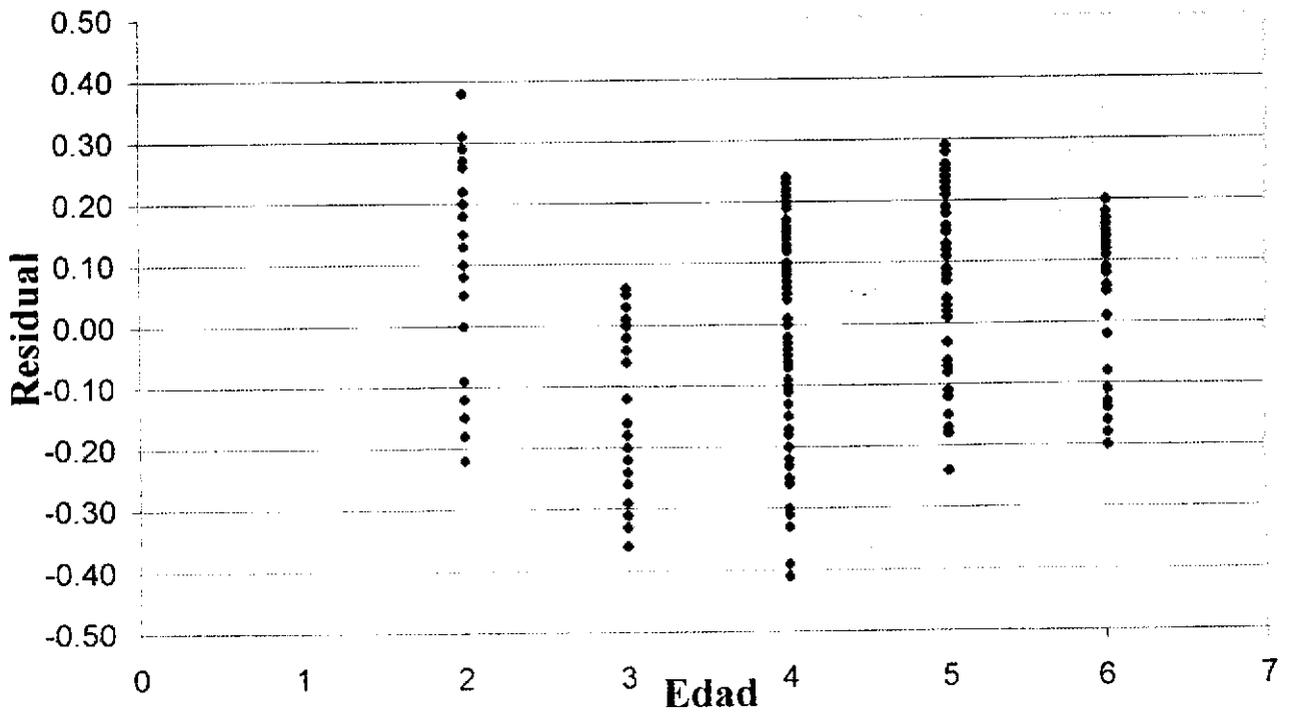
Residuales Versus Edad. Modelo 8  
(residuales de ALTURA)



Residuales Versus Edad. Modelo 9  
(residuales de ALTURA)



Residuales Versus Edad. Modelo 10  
(residuales de ALTURA)



Residuales Versus Edad. Modelo 11  
(residuales de ALTURA)

