

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

TRABAJO DE DIPLOMA

**Modelos para la estimación del volumen de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
en plantaciones puras en el Ingenio San Antonio, Chinandega.**

AUTOR: Br. ALBERTO MARTIN SANDINO

ASESOR: Ing. M.Sc. EDILBERTO DUARTE

Managua, Nicaragua
Abril, 1997.

CONTENIDO

Sección	Página
CONTENIDO.....	i
INDICE DE FIGURAS.....	iii
INDICE DE CUADROS.....	iv
RESUMEN.....	v
I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISION 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 Generalidades sobre la estimación del volumen forestal.....	6
2.4.1 Definición de tablas de volumen.....	7
2.4.2 Tipos de tablas de volumen.....	7
2.4.3 Datos necesarios para construir tablas de volumen.....	8
2.4.4 Métodos de construcción de tablas de volumen.....	9
2.4.5 Estadígrafos empleados en el ajuste por regresión.....	10
2.4.5.1 Un método de comparación de modelos (El Índice de Furnival.).....	11
2.5 Generalidades sobre el cálculo del factor de forma.....	13
III. METODOLOGIA.....	15
3.1 Ubicación y descripción del sitio.....	15
3.2 Establecimiento del estudio.....	17
3.2.1 Descripción general de los sitios de muestreo.....	17
3.2.2 Método de cubicación e instrumentos utilizados.....	18
3.2.3 Variables y fórmulas empeadas para obtener el volumen estimado de cada árbol.....	20
3.2.4 Definición del modelo general.....	22
3.2.5 Planteamiento de modelos específicos.....	23

3.2.6 Estadígrafos y estadísticos empleados para el análisis de los modelos seleccionados.....	24
3.2.7 Variables y fórmulas empleadas para calcular el factor de forma artificial.....	26
3.3 Manejo de datos.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	29
4.1 Ajuste de modelos y estadísticos obtenidos.....	29
4.1.1 Modelos del grupo A.....	29
4.1.1.1 Coeficientes de correlación (R).....	29
4.1.1.2 Coeficientes de determinación (R^2).....	30
4.1.1.3 Desviación estándar residual (S).....	30
4.1.1.4 Valores del Índice de Furnival (I).....	31
4.1.1.5 Estadísticos de distribución F y T-student.....	31
4.1.2 Modelos del grupo B.....	31
4.1.2.1 Coeficientes de correlación (R).....	31
4.1.2.2 Coeficientes de determinación (R^2).....	32
4.1.2.3 Desviación estándar residual (S).....	32
4.1.2.4 Valores del Índice de Furnival (I).....	33
4.1.2.5 Estadísticos de distribución F y T-student.....	33
4.1.3 Factor de forma calculado.....	34
4.2 Discusiones.....	34
4.2.1 Acerca del ajuste de los modelos.....	34
4.2.2 Acerca del cálculo del factor de forma.....	37
V. CONCLUSIONES.....	38
VI. RECOMENDACIONES.....	40
VII. BIBLIOGRAFIA.....	41
VIII. ANEXOS.....	43

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pagina
1. Mapa de ubicación de sitios de muestreo.....	16
2. Mediciones del tallo de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Denhn.....	22

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Características generales para los compartimentos seleccionados de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Denh.....	17

RESUMEN

Las plantaciones forestales representan actualmente un elemento potencial para el desarrollo forestal en Nicaragua, por tanto para facilitar ésta actividad es necesario contar con las herramientas necesarias para su manejo adecuado, dentro de este contexto el conocimiento preciso del volumen forestal es una herramienta básica en el proceso de ordenamiento y producción forestal.

En este trabajo se ajustaron dos modelos de estimación del volumen para *Eucalyptus camaldulensis* Denhn. en plantaciones puras ubicadas en el Ingenio San Antonio, Chinandega, Nicaragua. Se tomó una muestra de 302 árboles, los cuales fueron cubicados en pie con el Relascopio de Bitterlich; la cubicación de cada árbol se hizo en secciones de 2 metros y el volumen de cada sección se calculó con la fórmula de Smallian, el volumen total de cada árbol se obtuvo de la suma de las secciones cubicadas. Además se calculó el factor de forma para la especie a partir de 166 árboles de los 302 que conformaron la muestra total.

Para el ajuste de los modelos propuestos en el presente trabajo se empleó el método de ajuste por mínimos cuadrados. Se plantearon 3 modelos para estimar el volumen con corteza del tallo en función del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y 4 modelos en función del DAP y la altura total; de éstos 7 modelos se seleccionaron 2 modelos ajustados para estimar el volumen, uno en función del DAP ($V = 0.0003087 \cdot d^{2.178}$) y el otro en función del DAP y la altura total ($V = 0.0002063 \cdot d^{1.467} \cdot h^{0.858}$). Para la selección de los mejores modelos los principales estadígrafos de regresión usados fueron los coeficientes de correlación (R), determinación (R^2), la desviación estándar residual (S) y los análisis estadísticos y gráficos de residuales de cada modelo; incluyéndose el índice de Furnival (I) como uno de los principales comparadores entre los modelos analizados, debido a que se utilizaron modelos transformados a través de la aplicación de logaritmos naturales y modelos sin ninguna transformación logarítmica.

Una vez seleccionados los 2 mejores modelos ajustados, éstos fueron convertidos en fórmulas que se emplearon para construir tablas de volumen respectivas, las cuales son un medio fácil, rápido y seguro de estimación de los volúmenes en pie de las masas forestales.

I. INTRODUCCION.

Actualmente los bosques naturales tropicales se encuentran en un acelerado proceso de degradación y destrucción (Lamprecht, 1990), en Nicaragua la situación es similar y por ejemplo; según proyecciones realizadas por el Plan de Acción Forestal (PAF, 1992), los bosques productivos de latifoliadas en el país podrían desaparecer dentro de los próximos 10 a 15 años. En la actualidad el manejo sostenible de los bosques naturales es difícil de implementar exitosamente a causa de las complejas condiciones económicas, políticas, ecológicas, sociales y técnicas que son necesarias para llevar a cabo dicha labor, por ésta razón se promueven actividades tales como la restauración de áreas de bosques degradados y el establecimiento de plantaciones forestales como alternativas ante la explotación de áreas más extensas de bosque natural. Dentro de este contexto la creación 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 rendimientos de dichas masas forestales; elementos tales como la edad, la calidad del sitio, el incremento y el volumen (FAO,1981).

El volumen individual de los árboles de un área determinada puede ser definido como una variable que depende de otras como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)* de cada árbol y su altura total; además de otras variables como

*** El DAP que se menciona en el documento es con corteza (DAPcc).**

la forma del árbol y la calidad del sitio, las cuales pueden considerarse constantes para dicha área (Ferreira, 1990); la relación que ocurre entre éstas variables puede representarse en forma de un modelo matemático que se obtiene a través del estudio y comparación de diferentes representaciones ó modelos que reflejen comportamientos distintos de las relaciones entre las variables estudiadas, de este modo el modelo seleccionado será el que represente de manera más exacta la relación existente entre el volumen y variables fáciles de medir como el DAP y la altura total. Una vez definidos los modelos es necesario encontrar sus parámetros, los que son representativos de la relación entre variables en cada modelo. Para obtener los parámetros se emplea el método de los mínimos cuadrados (Mendehall y Scheaffer, 1986; Cailliez, 1980). En base a éstos modelos se construyen las tablas de volumen; las cuales proporcionan de manera rápida y segura los volúmenes estimados en función de las variables de estado obtenidas.

El principal objetivo de éste trabajo es obtener dos modelos que estimen con mayor exactitud los volúmenes individuales de los árboles de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.; ubicados en plantaciones puras ubicadas en el Ingenio San Antonio, Departamento de Chinandega; Nicaragua. Ambos modelos deberán estimar el volumen, uno en función del DAP y el otro en función del DAP y la altura total; además en base a éstos modelos podrán construirse dos tablas de volumen respectivamente, las cuales facilitarán labores tales como el cálculo del volumen en la realización de inventarios forestales y otros cálculos relacionados con el proceso de ordenación y manejo forestal de la masa forestal en estudio. Es necesario mencionar que éste trabajo está definido para plantaciones con objetivos propios y con resultados aplicables solamente al área en 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 tablas de volumen de especies latifoliadas en el país.

Los objetivos planteados en éste trabajo son los siguientes:

Objetivo General:

- Obtener dos modelos para una estimación más precisa del volumen en pié de los árboles de *Eucalyptus camaldulensis* Denhn. en plantaciones puras ubicadas en el Ingenio San Antonio.

Objetivos específicos:

- Obtener un modelo para la estimación del volumen en función del DAP.
- Obtener un modelo para la estimación del volumen en función del DAP y la altura total.
- Determinar el factor de forma para *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en el área bajo estudio.

II. REVISION 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 Myrtaceae 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 paráfrasis (FAO, 1980).

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 ó 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 superiores 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 Generalidades sobre la estimación del volumen forestal.

El volumen forestal puede estimarse en distintas situaciones, tanto como madera tumbada y/o aserrada como en árboles en pié; en éste caso la estimación de volúmenes en pié es muy importante para la evaluación de existencias de volúmenes de madera de una masa forestal determinada, sin embargo el cálculo del volumen individual de los árboles de dicha masa se vuelve impráctico en áreas boscosas muy extensas debido a los elevados costos de tal operación, para superar ésta situación se han desarrollado métodos como el inventario forestal, que ofrece una adecuada estimación de los volúmenes de los árboles y otras características de masas forestales en base a inferencias estadísticas, dentro de éste contexto es necesario además conocer con mayor exactitud el comportamiento del volumen en dichas masas, lo cual se logra a través de métodos que relacionan variables de los árboles tales como diámetro y altura total con el volumen de éstos; al método más adecuado para obtener éstas relaciones se le conoce como tablas de volumen (Cailliez,1980).

2.4.1 Definición de tablas de volumen.

Las tablas de volumen son tabulaciones del volumen estimado de los árboles de diferentes dimensiones obtenido a través del cálculo de la relación de variables que son propias de la masa forestal en estudio (Loetsch y Zöhner, 1973); en las tablas el volumen es la variable que se obtiene de variables medidas ó estimadas en el terreno tales como el DAP y la altura total, además de otras que influyen en el volumen y pueden considerarse constantes en el área forestal determinada como son la forma del árbol y la calidad del sitio. La idea básica de las tablas de volumen es desarrollar una relación que estime adecuadamente el volumen en función de variables de fácil medición, tales como el DAP y la altura total (Ferreira, 1990).

2.4.2 Tipos de tablas de volumen.

Se conocen varios tipos de tablas de volumen (Ferreira, 1990) entre las cuales pueden mencionarse las tablas de volumen de tipo local, las cuales sólo utilizan el DAP como variable independiente aunque en su construcción se consideran otras variables; las tablas locales también pueden ser derivadas de una tabla de volumen de tipo general, la cual utiliza el DAP y la altura total como variables independientes. Cailliez (1980) las clasifica como tablas de volumen de una entrada cuando se usa el DAP como variable independiente, de dos entradas cuando se incluyen el DAP y la altura total como variables independientes y de tres entradas las cuales además del DAP y la altura total miden el DAP a la mitad de la altura; éste modelo se adapta a masas en las cuales las mediciones de los diámetros son más difíciles que la medición de alturas. Otros autores (Loetsch et.

al, 1973;) mencionan las tablas de volumen con clave de forma, las cuales son tablas de volumen generales con la forma del árbol incorporado como variable.

2.4.3 Datos necesarios para construir tablas de volumen.

Los datos básicos para construir tablas de volumen se obtienen de una muestra representativa de la población total de árboles siendo aconsejable seleccionarla al azar (Ferreira, 1990). El tamaño de la muestra depende de las características del bosque y según Cailliez (1980) para un rodal monoespecífico y homogéneo se consideran necesarias muestras de 50 a 100 árboles para tablas de una sola entrada y de 80 a 150 para tablas de doble entrada, aunque como se dijo anteriormente es importante tomar en cuenta factores como la edad del bosque y su correspondiente división en estratos así como la calidad del sitio donde se encuentran. El número total de árboles puede depender de otros criterios; por ejemplo Ferreira (1990) recomienda es necesario medir al menos 10 árboles por categoría diamétrica. Según Cano y Saravia (1993) para elaborar tablas volumétricas de *Pinus oocarpa* Schiede. en Nicaragua bastaron 272 árboles, en México (De la Vega, 1987; ver Cano y Saravia, 1993) se usaron muestras de 200 a 800 árboles para al elaborar tablas de volumen para un mismo género en diferentes estados del país.

Por otra parte, las mediciones necesarias para cada uno de los árboles de la muestra se efectúan sobre el DAP, la altura total y el volumen básicamente, aunque para construir tablas de volumen que incluyen otras variables tales como diámetros a diferentes alturas y la edad del árbol es necesario incluir dichas variables durante el proceso de medición (FAO, 1981).

2.4.4 Métodos de construcción de tablas de volumen.

Existen diversos métodos para la construcción de tablas volumétricas los cuales se pueden dividir en métodos directos y métodos indirectos; los métodos directos contemplan a su vez el método gráfico o de ajuste gráfico y el cálculo de volúmenes promedios; dentro de los métodos indirectos se inscribe el método de estimación de modelos por mínimos cuadrados. Según diversos autores (Ferreira, 1990; Cailliez, 1980 ; Cano y Saravia, 1993), el ajuste de modelos por mínimos cuadrados es el método estadístico más adecuado para el diseño de las tablas de volumen.

Para describir la relación entre el volumen, el DAP y la altura total se plantean distintos modelos que describen distintos grados de relación entre las variables mencionadas, éstos modelos son ajustados por el método de mínimos cuadrados, el cual está contemplado dentro del análisis de regresión. El objetivo del análisis de regresión es seleccionar el modelo que estime con mayor precisión el comportamiento de las variables mencionadas, es decir que estime con mayor precisión el volumen en función del DAP y la altura total. El ajuste por mínimos cuadrados está fundamentado en la premisa de que el modelo que mejor satisface la relación entre variable dependiente (volumen) y variables independientes (DAP y la altura total) es el que produce una menor desviación ó diferencia entre los valores de los volúmenes reales elevados al cuadrado con respecto a los volúmenes al cuadrado calculados por dicho modelo (Mendehall et.al., 1986).

obtenidas. Según Ferreira (1990) el problema no es tanto la obtención de los parámetros del modelo, sino la elección del modelo que proporcione un mejor ajuste entre otros modelos planteados.

La selección de los modelos a comparar depende de diversos factores, entre los cuales Cailliez (1980) destaca en primer lugar la importancia de la simplicidad del modelo, es decir que son preferibles aquellos modelos que presenten el menor número de parámetros en su construcción; otro factor importante es la ponderación del modelo, la cual se realiza cuando existe una gran cantidad de datos y se desea ajustar con alta precisión el modelo, en el presente trabajo la inclusión de modelos ponderados en un grupo de modelos para su análisis no se considera esencial; finalmente uno de los factores más importantes que afectan el uso de los modelos son las transformaciones. Una de las transformaciones más comúnmente efectuadas es la aplicación de logaritmos naturales a los modelos; ésta es una técnica que sido ampliamente empleada y recomendada por diversos autores (FAO, 1981; Cano y Saravia, 1993; Otárola y Ugalde, 1981) debido a la similitud del comportamiento de dichos modelos transformados con el comportamiento real de las variables estudiadas.

2.4.5 Estadígrafos empleados en el análisis de regresión.

El ajuste de modelos por mínimos cuadrados provee únicamente los parámetros ajustados para 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 éstos criterios podemos

mencionar los coeficientes de correlación (R^2) y de determinación (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 sea válido o no para estimar los valores reales de la población; y la prueba T de student, la cual valora la capacidad de estimación de las variables independientes de cada modelo (DAP, altura total). 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.

2.4.5.1 Un método de comparación de modelos (El índice de Furnival).

Debido a que en el presente trabajo se utilizaron modelos transformados a través de la aplicación de logaritmos naturales se requirió de un criterio de comparación que permitiese unificar los resultados obtenidos por cada modelo, ya que según Furnival (1961) para un grupo de modelos en los cuales la misma variable dependiente ha sido transformada, no es aceptable matemáticamente efectuar comparaciones directas entre modelos transformados y no transformados a través del uso de estadígrafos como el coeficiente de correlación (R), debido a que las respuestas no están a la misma escala; ésta situación también afecta la distribución de residuales, los cuales también están influenciados por la transformación de las variables ya que el resultado de estas transformaciones generarán residuales a escalas distintas. Una solución a éste problema consiste en el uso de la máxima verosimilitud de cada modelo como un criterio para seleccionar el más apropiado, bajo los supuestos de que las estimaciones por mínimos cuadrados con errores no ponderados son equivalentes a las estimaciones

de máxima verosimilitud siempre que los errores estén distribuidos normalmente, de forma independiente y con una desviación estándar constante.

Furnival (1961) propuso la siguiente fórmula general:

$$I = [1 / f(v)] * S \quad (1)$$

Donde:

S = desviación estándar residual (S) de la regresión ajustada.

v = media geométrica de la variable dependiente (volumen en este caso).

I = valor del índice Furnival.

Por otra parte, Zamudio (s.f.) modificó la fórmula original para poder apreciar la influencia del número de parámetros que usa cada modelo evitando la presencia de sesgo en favor de un modelo con menos parámetros (Parágrafo 2).

$$I = [1 / f(v)] * [1 / (\frac{n-r}{n}) * CME] \quad (2)$$

Donde:

CME = cuadrado medio del error.

n = tamaño de la muestra.

r = número de parámetros.

En el presente trabajo se usaron dos transformaciones del índice de Furnival, modificado por Zamudio, la primera para modelos sin ninguna

transformación de variables (Parágrafo 3) y la segunda para estimar el índice en modelos transformados por logaritmicación natural (Parágrafo 4):

$$I = 1 / [\left(\frac{n-r}{n} \right) * CME] \quad (3)$$

$$I = [v] * \sqrt{ \left[\left(\frac{n-r}{n} \right) * CME \right] * [1 / (\log e^1)] } \quad (4)$$

Donde:

$\log e^1 =$ es el logaritmo base 10 de la potencia e^1 .

$v =$ media geométrica de la variable dependiente (volumen).

El valor resultante del índice (Zamudio, s.f.) proporcionará el nivel de ajuste y debido a que los índices están en orden inverso a las verosimilitudes de cada ecuación, un valor grande del índice indica un ajuste pobre y viceversa.

2.5 Generalidades sobre el cálculo del factor de forma

Según F. Cailliez (1980) el DAP y la altura total del árbol no son suficientes para describir totalmente la forma de éste. El volumen de los árboles calculado individualmente necesita un indicador de la forma del tallo a medir además del DAP y la altura total, pues cada volumen que pueda considerarse en un árbol tiene su correspondiente factor de forma ó factor mórfico, así el coeficiente natural de forma correspondiente al volumen total de una árbol está generalmente comprendido entre los valores de 0.3 a 0.6, teniendo 0.56 el factor correspondiente a la figura de un paraboloides, 0.41 para un cono y 0.34 para un neiloide. El factor de forma varía de una especie a otra, dentro de la especie, la

cual crece en diferentes sitios y también varía con la edad del árbol (INTECFOR, 1993).

Según la FAO (1981) el factor de forma artificial para *Eucalyptus camaldulensis*. Dehnh, se ha estimado en base a muestras de árboles con alturas totales comprendidas en intervalos de 10 m a 15 m y DAP comprendidos en intervalos de 10 cm a 15 cm, de los cuales se obtuvieron fluctuaciones del factor de forma que oscilan entre los 0.365 en Marruecos hasta 0.520 en Italia.

En algunos estudios (FAO, 1981) se ha observado que el factor de forma para el género *Eucalyptus* se mantiene constante a medida que el árbol envejece, sin embargo en la mayoría de dichos estudios el factor de forma aumenta con la edad hasta que el árbol tiene una altura total y DAP determinados y después tiende a disminuir. Para obtener un factor de forma representativo para una especie en un conjunto de “n” árboles es necesario cubicar varios árboles representativos de la especie en dicho conjunto (INTECFOR, 1993; Cailliez, 1980); una vez obtenido el volumen real de los árboles, éste se divide entre el volumen del cilindro generado por el DAP y la altura total y al promedio de los factores obtenidos del conjunto de árboles seleccionados se le conoce como factor de forma artificial para dicho conjunto.

III. METODOLOGIA.

3.1 Ubicación y descripción general del sitio.

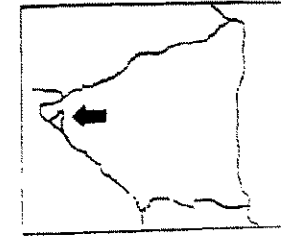
La recopilación de datos para construir las tablas de volumen se llevó a cabo en plantaciones puras de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en diversos sitios del área propiedad del Ingenio San Antonio (I.S.A.). Parte de éstas áreas eran usadas antiguamente como pastizales distribuidos irregularmente entre 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, situación que puede apreciarse en el Mapa de ubicación de sitios de muestreo (Figura 1).

El área total que ocupaban las plantaciones al finalizar la etapa de campo (Primero de Agosto de 1996) era de 1067 hectáreas, distribuidas en 35 compartimientos individuales con áreas de diferente extensión. 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).

Figura 1.

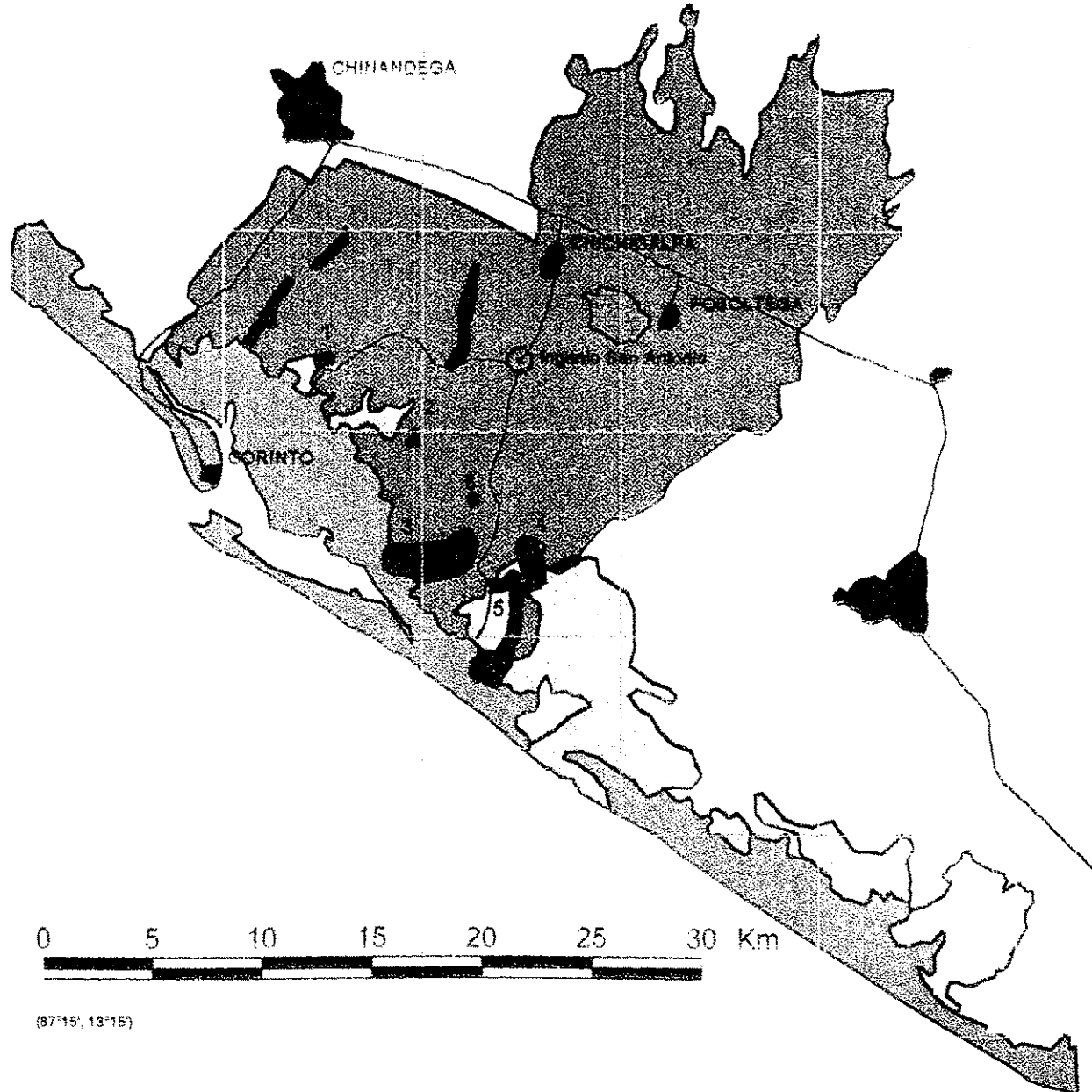
UBICACION SITIOS DE MUESTREO



LEYENDA

-  CAMINOS
-  SABANA
-  BANANO
-  BOSQUE RALO
-  CAÑA
-  CIUDADES
-  MANGLAR
-  PLANTACIONES

- 1. SITIO ZORRA
- 2. SITIO BORREL
- 3. SITIO EL MORA
- 4. SITIO TORO PINTO
- 5. SITIO MIRAVALLS
- 6. SITIO JERICO



3.2 Establecimiento del estudio.

3.2.1 Descripción general de los sitios de muestreo.

Para realizar el estudio se seleccionaron 10 compartimientos como sitios de muestreo, los que presentaron características representativas de la masa forestal en general en cuanto a edad, altura total y DAP (Cuadro 1), dentro de éstos se escogieron selectivamente los árboles de la muestra según las características de representatividad antes mencionadas a nivel del compartimento.

CUADRO 1. Características generales para los compartimientos seleccionados de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

compartimiento (nombre)	Edad (años)(*)	Area (ha)	pendiente (%)	N° de árboles cubicados
La Campana	1.85	5.62	5	8
Manchester	1.83	37.93	6	17
El Muerto	2.75	18.96	3	10
Jesús María	2.83	5.62	6	5
El Mora	2.83	44.95	6	58
Jericó	9	2.81	1	6
Toro Pinto	1.91	31.61	5	51
Miravalle	2.75	14.05	4	9
Borrel	1.83	14.05	0	14
Zorra	9	14.05	0	124
TOTAL		189.65		302

NOTA: (*) Edad de los árboles a la fecha del muestreo.

3.2.2 Método de cubicación e instrumentos utilizados.

En este estudio se cubicaron árboles en pie utilizando el Relascopio de Bitterlich, de forma sintética el procedimiento puede describirse de la siguiente manera:

a. Una vez ubicado el árbol dentro del compartimiento se midieron el DAP(**), el diámetro de la base y el diámetro a 2 m de altura a partir de la base del árbol. Dichas mediciones se realizaron con cinta diamétrica y en cm como unidad básica.

b. Se midió la pendiente en porcentaje del área con un clinómetro Suunto, procurando encontrar puntos a un mismo nivel para poder medir con mayor exactitud una distancia horizontal del árbol a un punto de observación; tratando a la vez de obtener en dicho punto una mejor visualización del fuste completo del árbol.

c. Con una cinta métrica se midieron 20 m como la distancia horizontal del árbol al punto de observación. Desde dicho punto se midieron con el relascopio los tres diámetros medidos anteriormente con cinta diamétrica(**); una vez constatada la similitud entre ambas mediciones se midió el diámetro en cm del fuste ó tallo principal del árbol desde la base hasta su ápice ó yema terminal. Las mediciones de diámetro se realizaron cada 2 m (base del árbol = 0 m de altura)

(**) El volumen de los árboles cubicados corresponde al volumen total del tallo sin incluir ramas ni raíces, tomándose como volumen bruto con corteza en m^3 .

(***) En árboles de pequeñas dimensiones (2,3 y hasta 4 metros de altura total) se midieron los diámetros directamente con cinta, sin usar el relascopio.

hasta una última sección la cual se estimó de 1 a 2 m según la altura total del árbol.

d. La altura total del árbol se midió en metros con el relascopio simultáneamente a la medición de los diámetros y posteriormente se comparó con la altura total medida con el clinómetro Suunto.

e. En una hoja con formato especial (Anexo 2.1) se anotaron para cada árbol el DAP, su altura total y el diámetro cada 2 m, además de otras características del lote seleccionado.

3.2.3 Variables y fórmulas empleadas para obtener el volumen estimado de cada árbol.

Las variables obtenidas del proceso de cubicación en pie que se usaron para calcular el volumen estimado para cada árbol fueron las siguientes:

- Altura total del árbol en metros
- Diámetro a la Altura del Pecho en centímetros
- Diámetro en centímetros en diferentes secciones del árbol.

Una vez seccionado el árbol (Figura 2) y conocidas las variables antes mencionadas se procedió a usar la fórmula de Smallian (Parágrafo 6) para calcular el volumen de cada sección y a la suma de los volúmenes de cada sección le llamamos volumen estimado total para el árbol (Parágrafo 7).

$$g_0 = 0.7854 * (d / 100)^2 \quad (5)$$

Donde:

g_0 = área basal del extremo inferior de la sección en m^2 .
 d = diámetro en cm.

$$V_s = [(g_0 + g_1) / 2] * h_{0-1} \quad (6)$$

Donde:

V_s = volumen de la sección en m^3 .
 g_1 = área basal del extremo superior de la sección en m^2 (se calcula del mismo modo que S_0).
 h_{0-1} = longitud de la sección en m.

En este caso la longitud de la sección es constante (2 metros); excepto la última sección (apical), la que puede medir 1 ó 2 m según la altura total del árbol. Como en el Parágrafo 6, la longitud de la sección (h_{0-1}) es constante e igual a 2 m excepto la última sección, podemos despejar dicha fórmula para simplificar su estructura y calcular con mayor facilidad el volumen estimado total en m^3 para cada árbol (Parágrafo 7).

$$V_t = [(g_0 + g_1) / 2] * h_{0-1} + [(g_1 + g_2) / 2] * h_{1-2} + [(g_2 + g_3) / 2] * h_{2-3} + \dots + [(g_{n-1} + g_n) / 2] * h_{n-1-n}$$

sin embargo, si $h_{0-1}, h_{1-2}, h_{2-3}, h_{n-1-n} = 2$ metros, excepto si la sección final es 1 m, podemos decir :

$$V_s = [(g_0 + g_1) / 2] * 2 \text{ m, al factorizar 2 tenemos; } V_s = [(g_0 + g_1) * m], \text{ para obtener :}$$

$$V_t = [(g_0 + g_1) * m] + [(g_1 + g_2) * m] + [(g_2 + g_3) * m] + \dots + [(g_{n-1} + g_n) * m]$$

ó bien;

$$V_t = [(g_0 + g_1) * m] + [(g_1 + g_2) * m] + [(g_2 + g_3) * m] + \dots + [[(g_{n-1} + g_n) / 2] * m]$$

(en el caso que la última sección sea impar, es decir 1 m).

De otro modo puede expresarse como:

$$V_t = V_{S(0-1)} + V_{S(1-2)} + V_{S(2-3)} + \dots + V_{S(n-1-n)} \quad \text{ó} \quad V_t = \sum_{i=1}^n V_s \quad (7)$$

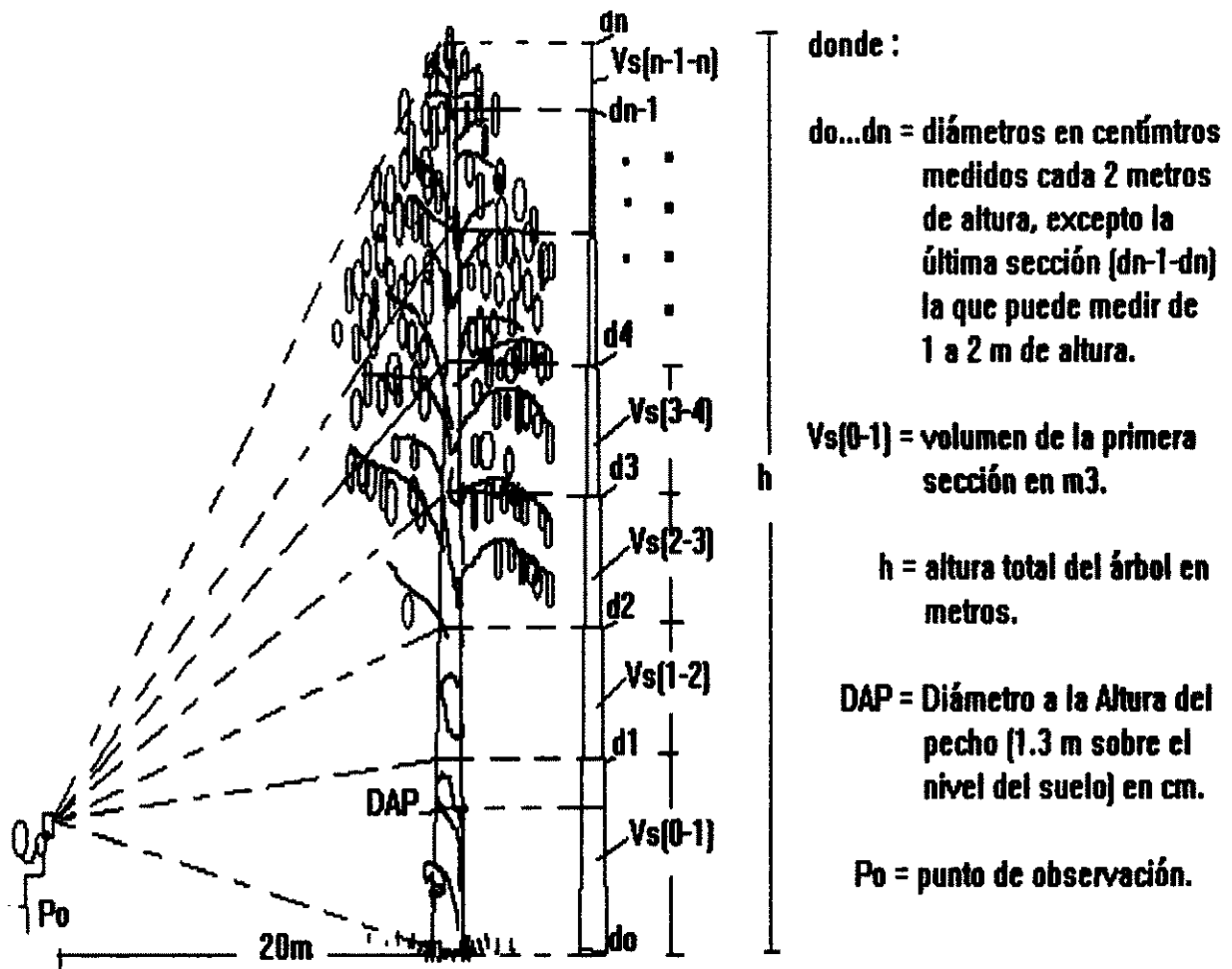


Figura 2. Mediciones del tallo de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

3.2.4 Definición del modelo general.

Se escogió un modelo general para representar la relación matemática en la cual “Y” es el volumen de los árboles en m^3 es la variable de respuesta, “x” es una ó varias variables independientes las cuales pueden ser el DAP en cm y la

altura total en metros y $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ son los parámetros por ajustar del modelo; como puede apreciarse en el modelo general (Parágrafo 8).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (8)$$

3.2.5 Planteamiento de modelos específicos.

A partir del modelo general se analizaron 7 modelos distintos (Loetsch, 1973) en base a una muestra de 302 árboles (Anexo 1.1). Estos 7 modelos fueron distribuidos en dos grupos funcionales, en el Grupo A se analizaron los modelos que estiman el volumen del tallo de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., en m³ en función del DAP), y en el Grupo B se analizaron los modelos que estiman el volumen del tallo en función del DAP (d) y la altura total de los árboles (h).

Modelos del Grupo A:

$$A1. \quad V = \beta_0 + \beta_1 d$$

$$A2. \quad V = \beta_0 + \beta_1 d^2$$

$$A3. \quad \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d)$$

Modelos del Grupo B:

$$B1. \quad V = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h$$

$$B2. \quad V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$$

$$B3. \quad \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h)$$

$$B4. \quad \ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(h)$$

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

Los modelos presentados se evaluaron a través del análisis de regresión, dentro de éste análisis se calcularon los parámetros (β_0 , β_1 , y β_2) para cada modelo, las fórmulas para el cálculo de los parámetros se presentan a continuación:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_{i1} - \bar{x}_1)^2}$$

$$\beta_2 = \frac{\bar{y} - \beta_1 \bar{x}_1 - \beta_0}{\bar{x}_2}$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}_1$$

donde:

β_0 , β_1 , β_2 = parámetros de ajuste.

x_1 , x_2 = variables independientes (DAP, altura)

y = variable dependiente (volumen)

n = tamaño de la muestra

\bar{x}_1 , \bar{x}_2 , \bar{y} = medias de las variables respectivas.

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 ó valor de las variables independientes 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:

$$R^2 = SCR / SCT \quad (12)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (13)$$

$$S = \sqrt{CME} \quad (14)$$

$$F = CMR / CME, F \text{ tabulado con gl.} = m, n-m-1 \quad (15)$$

$$T = [\bar{x} - \mu] / [S / \sqrt{n}], T \text{ tabulado con gl.} = n-m-1 \quad (16)$$

Donde :

$SCT = SCR + SCE$
 $CMR = SCR / m$
 $CME = SCE / n-m-1$
 $SCT =$ Suma total de cuadrados.
 $SCR =$ Suma de cuadrados del error.
 $SCE =$ 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.

$r =$ Número de parámetros.
 $m =$ Número de variables predictoras (DAP, altura total).
 $n =$ Tamaño de la muestra (número total de obervaciones).

3.2.7 Variables y fórmulas empleadas para calcular el factor de forma artificial.

Las variables usadas para calcular el factor de forma artificial para la especie en el área bajo estudio fueron:

- Altura total del árbol en metros.
- Diámetro a la altura del pecho (DAP) en centímetros.
- Volumen estimado total del árbol en m³.

La fórmula descrita para calcular el factor de forma artificial (Parágrafo 10) se empleó debido a que el volumen total del conjunto de los árboles aparece explícitamente en ella (Cailliez, 1981) :

$$v_c = 0.7854 (d^2 * h) \quad (17)$$

Donde:

v_c = volumen del cilindro generado por el DAP y la altura total (en m³).

d = diámetro a la altura del pecho con corteza en m.

h = altura total en metros.

$$f_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_t}{\sum_{i=1}^n v_c} \right] \quad (18)$$

Donde:

v_t = volumen estimado total del árbol en m³

f_i = factor de forma artificial promedio.

Para calcular el f_i de la especie en cuestión se utilizó una muestra de 166 árboles (Anexo 1.2) de los 302 árboles que conformaron la muestra total (Anexo 1.1), dicha muestra fué constituida con árboles de las clases diamétricas de 10 cm hasta 25 cm, tomando 10 árboles o más por cada clase diamétrica (Anexo 1.2).

3.3 Manejo de datos.

El manejo de los datos obtenidos, procedimiento, 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 Microsoff Office[®] para Windows[®]), con los datos obtenidos en la cubicación (número de árboles, DAP, altura total, diámetros a diferentes alturas).
- b. Se estimó el volumen estimado total del tallo en m^3 para cada árbol usando las fórmulas descritas (Parágrafos 5, 6 y 7) a partir del archivo maestro de datos.
- d. Con los datos del estudio se realizó el ajuste por mínimos cuadrados (Parágrafos 9, 10 y 11) para 7 modelos en el programa estadístico MINITAB[®] para Windows[®], tomando como variables independientes los DAP y las alturas totales de los 302 árboles que conformaron la muestra y como variable dependiente los volúmenes estimados respectivos para cada árbol de la muestra. Los análisis generales para determinar los mejores modelos del grupo fueron el

[®] Son marcas registradas de *Microsoft Corp.*, 1992 y *Minitab Inc*, 1996.

Análisis de Varianza (ANDEVA) de la regresión, el Análisis de regresión (Parágrafos 12, 13, 14, 15 y 16), y el análisis estadístico y gráfico de residuales.

c. Se creó un segundo archivo simplificado en el programa Excel[®], con los datos de número de árbol, altura total, DAP y volumen estimado. En este archivo se calculó el volumen de cilindros para cada árbol (Parágrafo 17) y el factor de forma artificial promedio (Parágrafo 18).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION..

4.1 Ajuste de modelos y estadísticos obtenidos.

Los resultados obtenidos del análisis de regresión y los estadísticos obtenidos pudieron sintetizarse en cinco criterios básicos, empleados para seleccionar los mejores modelos, éstos criterios fueron los siguientes:

- a- El coeficiente de correlación (R).
- b- El coeficiente de determinación (R^2).
- c- La desviación estándar residual (S).
- d- El valor del índice de Furnival (I).
- e- Los valores obtenidos de los estadísticos de distribución F y $T_{student}$.

El análisis comparativo de los criterios básicos se realizó en dos grupos funcionales: El grupo A, en el cual se analizaron modelos que estimó el volumen en función del DAP y el grupo B, en el cual se estimó el volumen en función del DAP y la altura total.

4.1.1 Modelos del Grupo A.

4.1.1.1 Coeficientes de correlación (R).

El modelo A3 obtuvo el mayor valor para el coeficiente de correlación (R) de los 3 modelos analizados en este grupo, presentando un valor $R=98.9\%$ de correlación entre las variables DAP y volumen, en comparación con los modelos

A2 y A1, los cuales presentaron valores $R=98.1\%$ y $R=93.3\%$ respectivamente, los valores de los parámetros (β_0 y β_1) de cada modelo pueden apreciarse en el Anexo 1.3

4.1.1.2 Coeficientes de determinación (R^2).

El coeficiente de determinación (R^2) que mostró el valor más alto fué el obtenido por el modelo A3, con un valor $R^2=97.9\%$, y en segundo lugar el modelo A2, el cual presentó un valor $R^2=96.3\%$; siendo el modelo A1 el de menor valor para el coeficiente de determinación $R^2=87.1\%$.

4.1.1.3 Desviación estándar residual (S).

La menor desviación estándar residual (S) en éste primer grupo de modelos fué la obtenida por el modelo A2, con un valor $S=2.65\%$, seguida por el modelo A1 con una $S=4.96\%$, siendo el modelo A3 el de mayor desviación estándar residual ,con un valor $S=26.57\%$; sin embargo al analizar gráficamente la distribución residual (Anexo 1.4) observamos que la distribución del modelo A3 es más uniforme con respecto a las presentadas por los otros 2 modelos del grupo, lo que indica que aún cuando el modelo A3 presenta una desviación alta con respecto a los demás modelos, sus errores están uniformemente distribuidos para cada categoría diamétrica y por tanto indica una mayor calidad de ajuste.

4.1.1.4 Valores del índice de Furnival (I).

El modelo que presentó el menor valor del índice de Furnival (I) fué el modelo A3, con un $I=0.0000022$, por otra parte el modelo A2 presentó un valor de $I=0.0263697$ y el modelo A1 un valor $I=0.0498246$ (Anexo 1.3).

4.1.1.5 Estadísticos de distribución F y T-student.

A los 3 modelos de éste grupo se les aplicó una prueba T para determinar si el aporte de la variable independiente (DAP) fué o no significativo. El resultado de ésta prueba fué que para los 3 modelos se obtuvieron valores $t \geq t_c=1.645$, a un nivel de confianza del 95% (ver anexo 1.3), lo que significó que la variable DAP de cada modelo realmente aportó algún efecto al modelo, de igual manera la prueba F del Análisis de Varianza (ANDEVA) mostró que las regresiones generadas por los tres modelos fueron significativas presentando valores calculados $F > F_c=254.3$, a un nivel de confianza del 95% (Anexo 1.3), en resumen se puede concluir que el modelo que presenta los mejores estadígrafos y estadísticos de regresión es el modelo A3.

4.1.2 Modelos del Grupo B.

4.1.2.1 Coeficientes de correlación (R).

Los valores más altos para los coeficientes de correlación (R) obtenidos en el análisis de los cuatro modelos del segundo grupo fueron alcanzados por dos modelos, es decir que ambos obtuvieron el mismo valor; así los modelos B3 y B4

alcanzaron un $R=99.3\%$, seguidos por el modelo B2, el cual obtuvo un valor $R=99.1\%$ y finalmente el modelo B1, que alcanzó un valor de $R=93.4\%$. Los parámetros ajustados por la regresión de cada modelo (β_0 , β_1 y β_2) pueden apreciarse en el Anexo 1.3.

4.1.2.2 Coeficientes de determinación (R^2).

Debido a que el coeficiente de determinación (R^2) no es más que el cuadrado de R , los valores obtenidos para R^2 son similares a los presentados anteriormente; así se tiene que el valor R^2 más alto fué alcanzado por los modelos B3 y B4, con un $R^2=98.6\%$ y valores menores para los modelos B2 y B1 con valores $R^2= 98.1\%$ y $R^2= 87.3\%$ respectivamente.

4.1.2.3 Desviación estándar residual (S).

La desviación estándar residual (S) más baja fué obtenida por el modelo B2, el cual presentó un valor $S=1.92\%$, seguido por el modelo B1, con un valor $S=4.92\%$, sin embargo éstos dos modelos mostraron distribuciones gráficas residuales anormales, es decir muestran cierta tendencia por agruparse en mayor número alrededor de diámetros superiores (Anexo 1.4), al contrario los modelos B3 y B4 mostraron desviaciones estándar elevadas, con $S=22.22\%$ y $S=22.21\%$ respectivamente pero ambos mostraron distribuciones gráficas residuales uniformes y sin tendencias preceptibles a inclinarse por algún rango de los diámetros presentados (Anexo 1.4).

4.1.2.4 Valores del índice de Furnival (I).

El modelo que mostró el menor valor para el índice de Furnival fué el modelo B4, con un valor $I=0.0000024$ seguido por el modelo B3 con un $I=0.0000025$ lo cual significa que prácticamente ambos modelos son igualmente buenos para estimar el volumen en función del DAP y la altura total en comparación con los demás modelos del grupo, los cuales obtuvieron valores $I=0.0199336$ e $I=0.0489080$, para los modelos B2 y B1 respectivamente.

4.1.2.5 Estadísticos de distribución F y T-student.

Se les aplicó una prueba T A los 4 modelos de éste segundo grupo para determinar si el aporte de las variable independientes (DAP y altura total) fué o no significativo. El resultado de ésta prueba fué que para los 4 modelos se obtuvieron valores $t \geq t_c=1.645$, a un nivel de confianza del 95% (ver anexo 1.3), lo que significó que las variables DAP (d) y altura total (h) de cada modelo si aportaron algún efecto al modelo, del mismo modo la prueba F del ANDEVA mostró que las regresiones generadas por los 4 modelos fueron significativas, presentando valores calculados $F > F_c=19.5$, a un nivel de confianza del 95% (Anexo 1.3); en este segundo grupo de modelos fué necesario realizar un análisis estadístico de los residuales de los modelos B3 y B4 debido a la similitud en las distribuciones residuales gráficas (Anexo 1.4), el análisis consistió básicamente en la creación de un rango de distribución de residuales para cada modelo (Anexo 1.3), de éste

modo el modelo que obtuvo el menor rango residual fué el modelo B4 con un rango $r = 1.8009$ y el modelo B3 un $r = 1.8213$, por lo que se puede concluir que el modelo B4 estima con mayor precisión el volumen en función del DAP y la altura total .

4.1.3 Factor de forma calculado.

El valor de f_i calculado en base a una muestra de 166 árboles (ver Anexo 1.2), extraída de la muestra total de 302 árboles fué de $f_i = 0.3848$, sin embargo éste puede emplearse simplemente como $f_i = 0.38$.

4.2. Discusiones.

4.2.1 Acerca del ajuste de modelos.

Los resultados del ajuste de los modelos planteados apoyan la idea de que los modelos transformados por la aplicación de logaritmos naturales estiman con mejor precisión el volumen tanto para tablas de volumen de una sola variable de entrada (DAP), como para tablas de doble entrada (DAP y altura total). Con respecto a ésta afirmación los resultados obtenidos son congruentes con los alcanzados en estudios previos (Cano y Saravia, 1993; Otárola y Ugalde, 1980), además los resultados obtenidos en éste trabajo incrementan la validez del análisis realizado al incluir el índice de Furnival, el cual es un comparador de máxima verosimilitud que ofrece un mejor criterio en la comparación de modelos y sus respectivos ajustes, principalmente en las comparaciones entre modelos que han sufrido alguna transformación y modelos que no han sido modificados, además

como se puede apreciar en el Anexo 1.3 , los estadígrafos de regresión, es decir los valores R , R^2 (excepto S) están fuertemente correlacionados con los valores obtenidos para el índice de Furnival, por lo que se puede deducir que es válido el empleo de dichos criterios en la comparación de modelos siempre y cuando se calcule el índice de Furnival para respaldar ó reforzar el valor de los estadígrafos de regresión calculados y proporcionar una mayor validez a la comparación de los modelos.

En los 7 modelos planteados los valores obtenidos para la Prueba t-student son significativos a un nivel del 95% de confianza ($t \geq t_c = 1.645$), 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 fué significativo en los 7 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), el índice de Furnival (I) y la desviación estándar residual (S), para cada modelo. Como se puede apreciar en el Anexo 1.3 los modelos A3 y B4 presentan valores R y R^2 e I más altos y aunque la desviación estándar residual (S) es superior a la mostrada por los demás modelos, la distribución residual gráfica de ambos modelos está distribuída uniformemente (Anexo 1.4) lo que indica una distribución del error aceptable estadísticamente. Finalmente, los modelos seleccionados (modelos A3 y B4) se deben retransformar para obtener un modelo completamente funcional, es decir para obtener fórmulas que proporcionen con facilidad el volumen en metros cúbicos; en este proceso se incluye el factor de corrección $[S^2 / 2]$ (donde S es la desviación estándar residual del modelo), con el objetivo de evitar el sesgo

resultante de una transformación logarítmica de la variable dependiente. La retransformación para el modelo A3 es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \ln (V) &= -8.118 + 2.178 * \ln (d) \\
 V &= e^{[-8.118 + 2.178 * \ln (d) + (S2/2)]} \\
 &= e^{[-8.118]} * e^{[2.178 * \ln (d)]} * e^{[(S2/2)]} \\
 &= e^{[(S2/2) - 8.118]} * e^{[2.178 * \ln (d)]} \\
 &= e^{[-8.083]} * e^{[2.178 * \ln (d)]} \\
 &= 0.0003087 * d^{2.178}
 \end{aligned}$$

Así mismo, el modelo B4 se puede retransformar de igual manera:

$$\begin{aligned}
 \ln (V) &= -8.511 + 1.467 * \ln(d) + 0.858 * \ln (h) \\
 V &= e^{[(-8.511) + 1.467 * \ln (d) + 0.858 * \ln (h) + (S2/2)]} \\
 &= e^{[-8.511]} * e^{[1.467 * \ln (d)]} * e^{[0.858 * \ln (h)]} * e^{[(S2/2)]} \\
 &= e^{[(S2/2) - 8.118]} * e^{[1.467 * \ln (d)]} * e^{[0.858 * \ln (h)]} \\
 &= e^{[-8.490]} * e^{[1.467 * \ln (d)]} * e^{[0.858 * \ln (h)]} \\
 &= 0.0002063 * d^{1.467} * h^{0.858}
 \end{aligned}$$

Donde:

V = Volumen en metros cúbicos.

d = Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en centímetros.

h = Altura total en metros.

4.2.2 Acerca del cálculo del factor de forma.

El factor de forma obtenido en éste trabajo, $f_i = 0.38$ puede ser ubicado dentro de un rango aceptable de 0.36 a 0.52, como se menciona en la literatura (FAO, 1981); debido a su forma de tipo neiloidal con tendencias a la forma cónica, por otra parte el valor del factor de forma para las figuras mencionadas corresponde a 0.34 y 0.41 respectivamente por lo que se puede decir que el factor de forma calculado es válido para éste estudio y aunque las tablas de volumen no requieren de la aplicación de un factor de forma para su cálculo, el f_i se incluye en éste trabajo debido a que es necesario contar con parámetros alternativos para facilitar las tasaciones forestales de la especie en el área.

V. CONCLUSIONES.

1. El modelo A3 obtuvo el mejor ajuste para la estimación del volumen del tallo de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en función de DAP y para utilizarlo de forma práctica fué transformado en la siguiente fórmula:

$$V = 0.0003087 * d^{2.178}$$

Donde “V” es el volumen en metros cúbicos y “d” es el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en centímetros.

2. El modelo B3 obtuvo el mejor ajuste para la estimación del volumen del tallo de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. en función de DAP y la altura total y para utilizarlo de forma práctica fué transformado en la siguiente fórmula:

$$V = 0.0002063 * d^{1.467} * h^{0.858}$$

Donde “V” es el volumen en metros cúbicos, “d” es el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en centímetros y “h” es la altura total en metros.

3. El factor de forma artificial (f_i) para *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. ubicada en plantaciones puras del Ingenio San Antonio, Chichigalpa, Nicaragua es: $f_i = 0.38$

4. Los modelos transformados mediante la aplicación de *logaritmos naturales* estiman con mayor precisión el volumen del tallo de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., debido a que los valores de ajuste de regresión para éstos modelos son superiores a los valores generados por los modelos no transformados.

5. El índice de Furnival es un criterio estadístico válido para comparar ecuaciones que han sufrido transformaciones con ecuaciones que no han sido transformadas, además el índice de Furnival está fuertemente correlacionado con criterios estadígrafos como el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación (R^2), y con criterios estadísticos gráficos como la distribución residual gráfica; a su vez éstos criterios refuerzan las conclusiones generadas por el índice de Furnival y son elementos imprescindibles en el análisis de ajuste de regresión y correlación de ecuaciones lineales sometidas o no a transformaciones.

VI. RECOMENDACIONES.

- 1. Se recomienda el uso de la metodología de cubicación en pié a través del relascopio de Bitterlich por ser una herramienta económica, sencilla y confiable para la construcción de tablas de volumen.**
- 2. Es necesario analizar diversos modelos para validar la calidad de los modelos seleccionados y proveer de una mayor confiabilidad a las tablas de volumen generadas por dichos modelos.**
- 3. Se sugiere que la aplicación de criterios como el índice de Furnival y 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 volumétrica.**
- 4. Es conveniente que la estimación de volúmenes a través del uso del factor de forma artificial y las dos fórmulas generadas en este trabajo se limiten en su aplicación a la zona en estudio y los rangos de predicción de los modelos estén limitados a las categorías diamétricas descritas en este trabajo ($1\text{cm} > \text{DAP} < 29\text{cm}$).**

VII. BIBLIOGRAFIA.

- CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol 1. estimación del volumen. ESTUDIO FAO: MONTES No. 22/1. FAO Roma; Italia. 92p.
- CANO, S.A.; SARAVIA, H.A. 1993. Elaboración de ecuaciones de volúmenes para *Pinus oocarpa* en Nicaragua (tesis Ing. Agr. UNA/MARENA. Managua, Nicaragua, 1993. 65p.
- CATIE. 1986. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña en América Central: Resultados de 5 años de investigación. CATIE. Dpto. de Recursos Naturales Renovables. Serie técnica. Informe técnico No.86. Turrialba, Costa Rica 1986.
- ECOT-PAF/ IRENA. 1992. Plan de Acción Forestal. Documento Base. Managua, Nicaragua. 90p.
- FERREIRA, R.O. 1990. Manual de inventarios Forestales. Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESNACIFOR) Serie Miscelánea No.8. Siguatepeque, Honduras.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. COLECCION FAO: Montes No.11.
- IICA. 1988. Fundamentos de comunicación científica y redacción técnica. IICA. Colección Libros y Materiales Educativos. n°88. San José, Costa Rica.
- FURNIVAL, G. M. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. Forest Science N°7. p 337-341.

INTECFOR 1993. Manual Técnico Forestal. 1era edición INTECFOR, IRENA, UNA, INATEC, Managua, Nicaragua.

LAMPRECHT, H. 1990. Silvicultura en los trópicos. 1ed. en español. GTZ.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F. 1973. Forest Inventory. Vol 2. BLV Verlagsgesellschaft. München-Bern Wien, Deutschland.

MENDEHALL, W.; SCHEAFFER, R. L. 1986. Estadística Matemática con aplicaciones. 1ra ed. en español. edit. Iberoamérica. México D.F., México.

UGALDE, L.A.; OTAROLA, A. 1981. Tablas de volumen para *Eucaliptus camaldulensis* Dehnh. en Nicaragua. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

ZAMUDIO, F. J. sf. El índice de Furnival, las correcciones de Bailey y comentarios indispensables a los dos. Universidad Autónoma Chapingo. Curso de Maestría en Manejo de Bosques. México D.F., México.

ANEXO 1

ANEXO 1.1 DISTRIBUCION DE ARBOLES MUESTREADADOS

ALTURA (m)	DAP (cm)																													TOTAL	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1	7	6																													13
2	1	9	7																												17
3		1	9	9	1	2																									22
4			3	5	3																										11
5				3	5	7	4	1																							20
6				1	4	3	3	2	1																						14
7					1	2	3	3	1	1																					11
8											1																				1
9							1	2	2	2																					7
10					1	1	1	2	3	1	1																				10
11								1	3	3	8	1	1	1																	18
12									1		1	7	3	4			2														18
13												5	3				1														9
14											1	1	1	1	1	1								1							7
15										1		1	2	4	3	1	2														14
16													3	2		1	2	1	1	2					1			1			14
17													2	3	1	1	2	3	1												13
18													1	2	4	4	3		1	1				1			1				17
19														1	2	2	1				3	3	1	3	2	1					19
20															1	1			2	2	1	2	3	1	1					1	15
21																	2			2	3	1							3		11
22																					1									1	5
23																						1	1		1	1	1	1			6
24																							2		1						3
25																								1		1	2				4
26																									1						1
27																												1			1
28																															0
29																												1			1
TOTAL	8	16	19	16	14	15	12	10	10	10	10	10	10	10	10	14	10	10	10	10	10	11	10	11	10	10	5	6	2	1	302

ANEXO 1.2 DISTRIBUCION DE ARBOLES SELECCIONADOS PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE FORMA.

ALTURA (m)	DAP (cm)																													TOTAL	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
1																														13	
2																														17	
3																														22	
4																														11	
5																														20	
6																														14	
7										1																				11	
8										1																				1	
9										2																				7	
10										3	1	1																		10	
11										3	8	1	1	1																18	
12										1	7	3	4				2													18	
13												5	3				1													9	
14											1	1	1	1	1	1								1						7	
15										1		1	2	4	3	1	2													14	
16													3	2		1	2	1	1	2					1					14	
17													2	3	1	1		2	3	1										13	
18													1	2	4	4	3		1	1										17	
19														1	2		2	1						3	3	1				19	
20															1	1					2	2	1	2	3	1				15	
21																		2				2	3	1						11	
22																							1			2	1			5	
23																							1	1		1	1	1		6	
24																								2		1				3	
25																								1		1	2			4	
26																										1				1	
27																											1			1	
28																														0	
29																											1			1	
TOTAL	8	18	19	18	14	15	12	10	10	10	10	10	10	10	10	14	10	10	10	10	10	11	10	11	10	10	5	6	2	1	302

ANEXO 1.3 RESUMEN DE AJUSTE DE MODELOS Y CRITERIOS DE SELECCION.

N°	Modelo	Modelo Ajustado	R(%)	R ² (%)	S(%)	I	Pruebas estadísticas			
							Fc	F	Tc	T
A1	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}$	$V = -0.0861 + 0.0164\text{DAP}$	87.1	93.3	4.96	0.0498248	2021	254.3	44.9	1.64
A2	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2$	$V = -0.0152 + 0.0006\text{DAP}^2$	98.1	96.3	2.65	0.0263697	7825	254.3	88.4	1.64
A3*	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP}$	$\ln V = -8.1179 + 2.1776 \ln \text{DAP}$	98.9	97.9	26.57	0.0000022	14172	254.3	119.1	1.64
B1	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 H$	$V = -0.0800 + 0.0191\text{DAP} - 0.0032H$	87.3	93.4	4.92	0.0489080	1029	19.5	16.2	1.64
B2	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 H$	$V = 0.063 + 0.00003 \text{DAP}^2 H$	99.1	98.1	1.92	0.0199336	14000	19.5	123.1	1.64
B3	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP}^2 H$	$\ln V = -8.4735 + 0.7704 \ln \text{DAP}^2 H$	99.3	98.6	22.22	0.0000025	20421	19.5	142.8	1.64
B4*	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{DAP} + \beta_2 \ln H$	$\ln V = -8.5107 + 1.4669 \ln \text{DAP} + 0.8581 \ln H$	99.3	98.6	22.21	0.0000024	10208	19.5	22.8	1.64

Donde: V = volumen en m³, DAP= diámetro a la altura del pecho en m., H= altura total en m., ln=logaritmo natural.

R = coeficiente de correlación

R² = coeficiente de determinación

S = desviación estándar residual

I = valor del índice de Furnival

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 (para la variable DAP)

T = valor T tabulado al 95% de confianza

(*) = modelos escogidos

ANEXO 1.4 ANALISIS GRAFICO RESIDUAL DE MODELOS AJUSTADOS.

Figura 3. Residuales Versus DAP (Modelo A1).

(residuales de VOLUMEN)

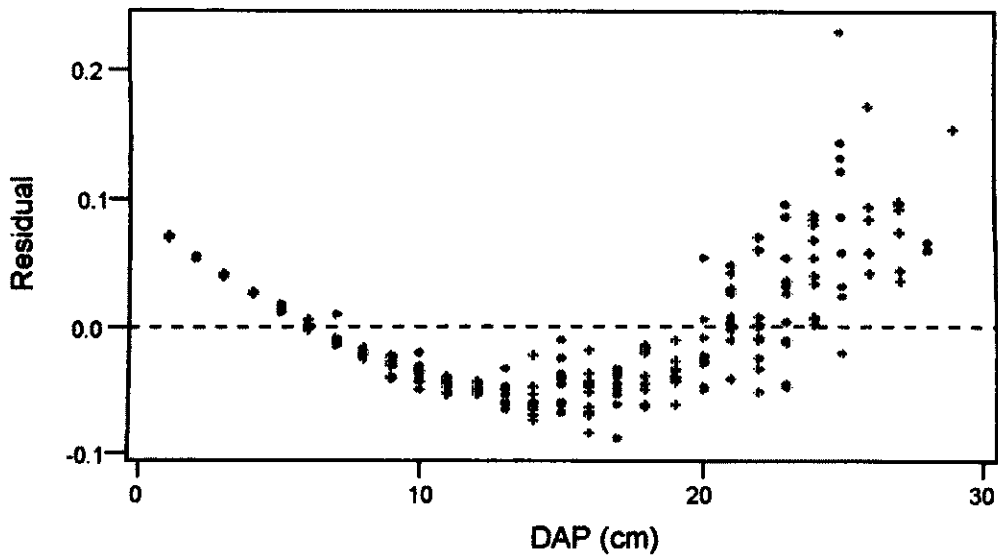


Figura 4. Residuales Versus DAP (Modelo A2).

(residuales de VOLUMEN)

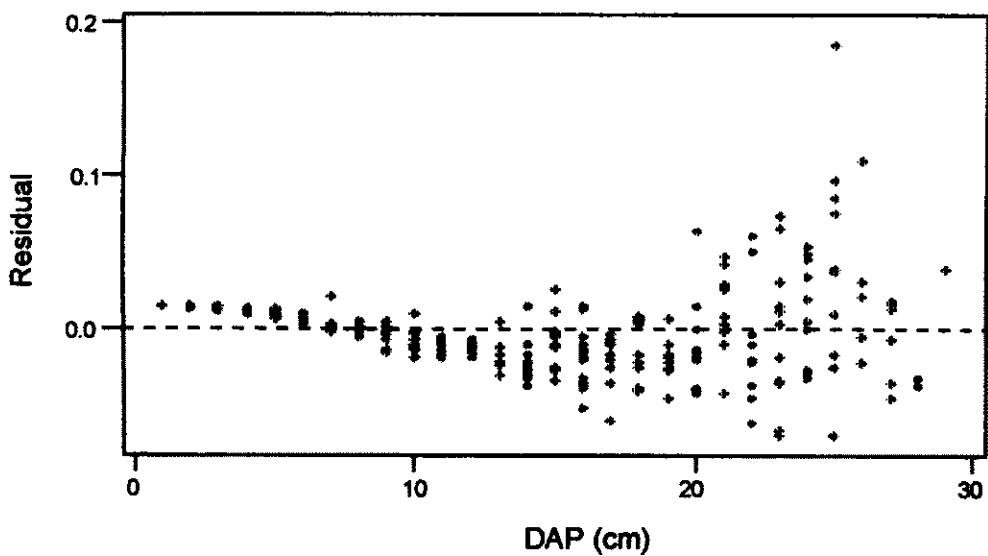


Figura 5. Residuales Versus DAP (Modelo A3)
(residuales de inVOLUMEN)

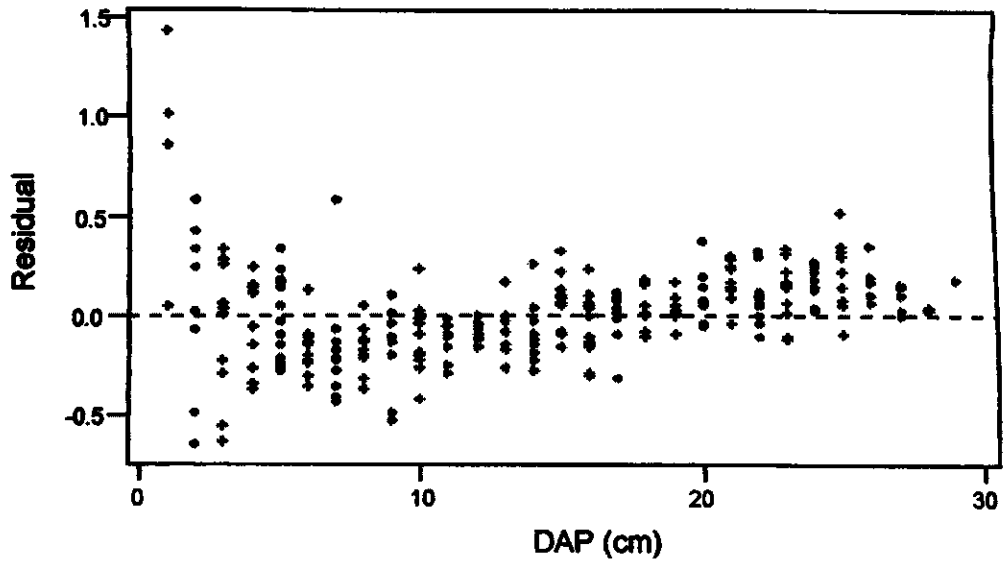


Figura 6. Residuales Versus DAP (Modelo B1)
(residuales de VOLUMEN)

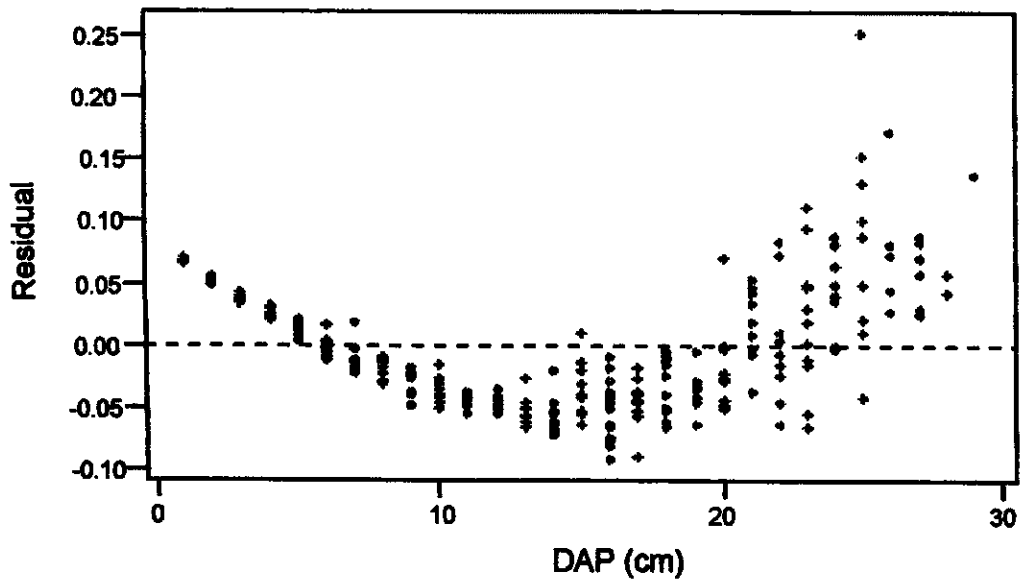


Figura 7. Residuales Versus DAP (Modelo B2)
(residuales de VOLUMEN)

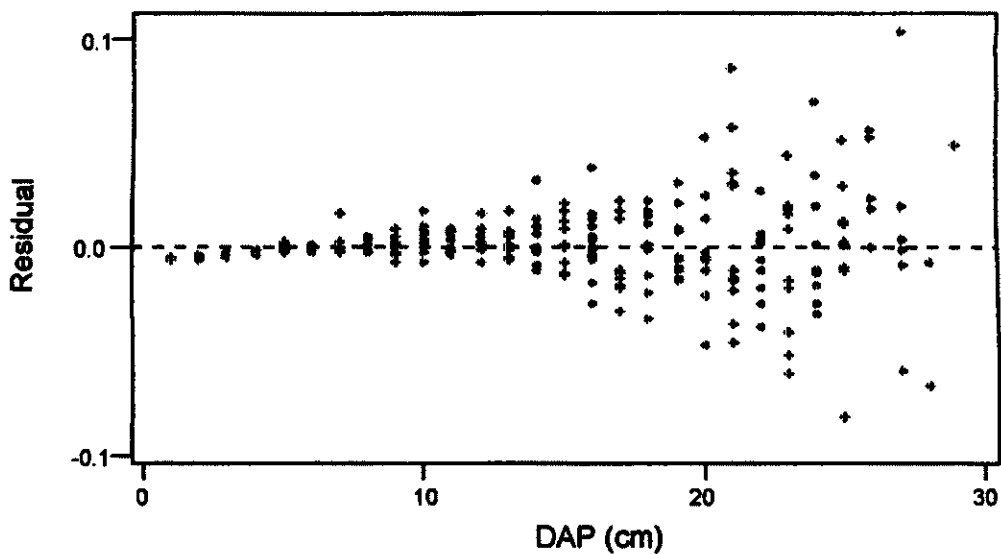


Figura 8. Residuales Versus DAP (Modelo B3)
(residuales de INVOLUMEN)

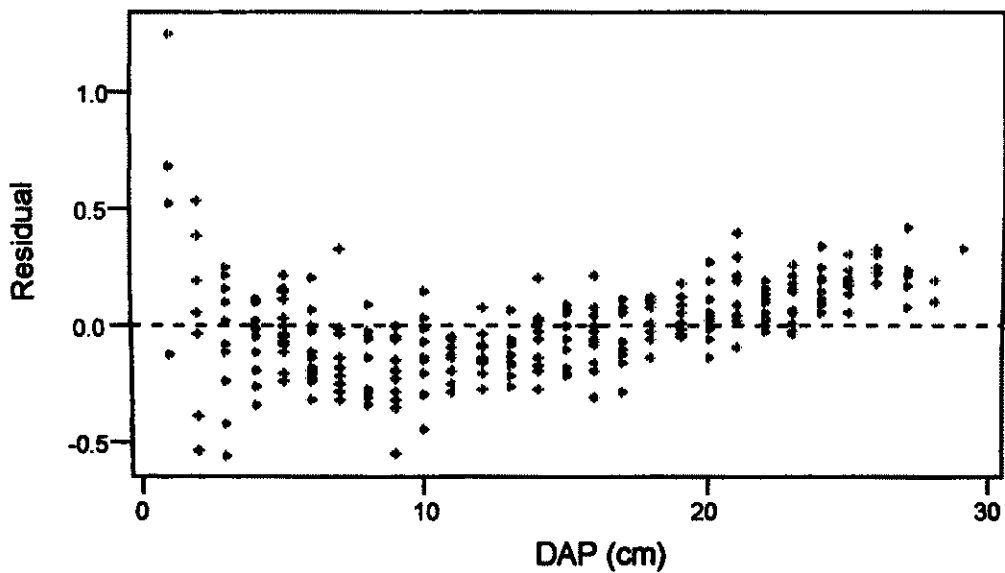
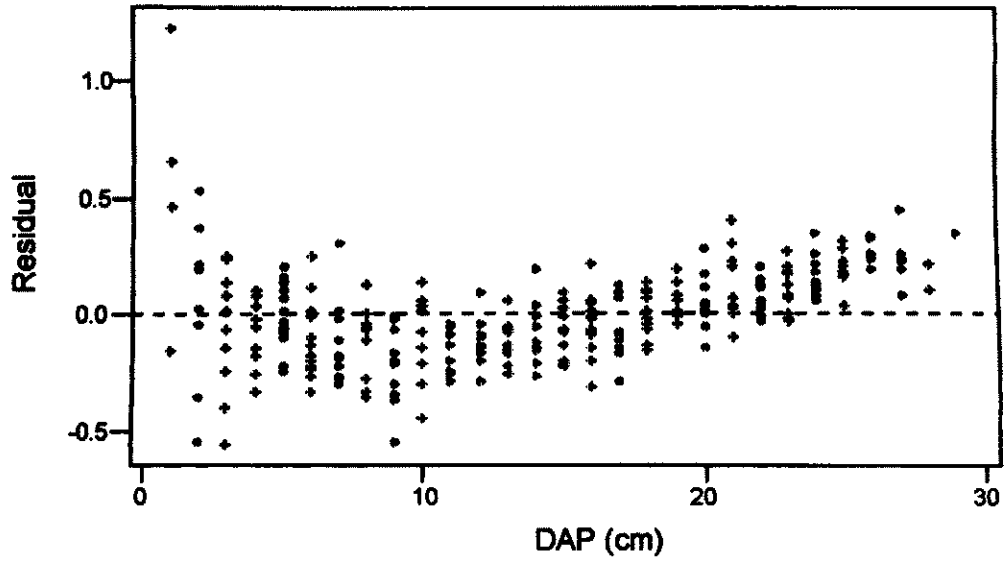


Figura 9. Residuales Versus DAP (Modelo B4)
(residuales de InVOLUMEN)



ANEXO 2

ANEXO 2.2 TABLA DE VOLUMEN PARA *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
EN FUNCION DEL DAP.

DAP (cm)	VOLUMEN (m3)
1	0.0003
2	0.0014
3	0.0034
4	0.0063
5	0.0103
6	0.0153
7	0.0214
8	0.0286
9	0.0370
10	0.0465
11	0.0572
12	0.0692
13	0.0824
14	0.0968
15	0.1125
16	0.1295
17	0.1477
18	0.1673
19	0.1882
20	0.2105
21	0.2341
22	0.2590
23	0.2854
24	0.3131
25	0.3422
26	0.3727
27	0.4046
28	0.4380
29	0.4728

(CONTINUACION ANEXO 2.3)

DAP (cm)	ALTURA TOTAL (m)																
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
11	0.0710	0.0751	0.0791														
12	0.0807	0.0853	0.0898														
13	0.0907	0.0959	0.1010														
14	0.1011	0.1069	0.1126	0.1183	0.1239												
15	0.1119	0.1183	0.1246	0.1308	0.1371												
16	0.1230	0.1300	0.1370	0.1439	0.1507	0.1575	0.1642	0.1709									
17	0.1345	0.1421	0.1497	0.1573	0.1647	0.1721	0.1795	0.1868									
18	0.1462	0.1548	0.1628	0.1710	0.1791	0.1872	0.1952	0.2031	0.2110	0.2189	0.2267	0.2344					
19	0.1583	0.1673	0.1763	0.1851	0.1939	0.2028	0.2113	0.2199	0.2285	0.2369	0.2454	0.2538	0.2621	0.2705	0.2787	0.2869	
20	0.1707	0.1804	0.1900	0.1996	0.2091	0.2185	0.2278	0.2371	0.2463	0.2555	0.2648	0.2736	0.2828	0.2916	0.3005	0.3094	
21					0.2246	0.2347	0.2447	0.2547	0.2646	0.2744	0.2842	0.2939	0.3036	0.3132	0.3228	0.3323	
22					0.2404	0.2513	0.2620	0.2727	0.2833	0.2938	0.3043	0.3147	0.3250	0.3353	0.3456	0.3558	
23					0.2566	0.2682	0.2797	0.2910	0.3024	0.3136	0.3248	0.3359	0.3469	0.3579	0.3688	0.3796	
24					0.2732	0.2855	0.2977	0.3098	0.3218	0.3338	0.3457	0.3575	0.3693	0.3810	0.3927	0.4042	
25							0.3160	0.3289	0.3417	0.3544	0.3670	0.3796	0.3921	0.4045	0.4169	0.4292	
26								0.3348	0.3484	0.3619	0.3754	0.3888	0.4021	0.4153	0.4285	0.4416	0.4546
27									0.3625	0.3766	0.4109	0.4250	0.4390	0.4529	0.4667	0.4805	
28									0.4035	0.4185	0.4334	0.4483	0.4630	0.4777	0.4923	0.5068	
29											0.4563	0.4719	0.4875	0.5029	0.5183	0.5336	