

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**FUNCIONES DE AHUSAMIENTO PARA PINO OREGÓN
(Pseudotsuga menziesii (Mirb.)) EN LA PROVINCIA DE VALDIVIA.**

Prof. Guía: Gonzalo Paredes.

Tesis presentada como parte de
los requisitos para optar al
Título de Ingeniero Forestal.

ANA MARÍA MAGDALENA SÁEZ ESTAY

VALDIVIA-CHILE

1997

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**FUNCIONES DE AHUSAMIENTO PARA PINO OREGÓN
(Pseudotsuga menziesii (Mirb.)) EN LA PROVINCIA DE VALDIVIA.**

Prof. Guía: Gonzalo Paredes.

Tesis presentada como parte de
los requisitos para optar al
Título de Ingeniero Forestal.

ANA MARÍA MAGDALENA SÁEZ ESTAY

VALDIVIA-CHILE

1997

CALIFICACIÓN COMISIÓN INFORMANTE.

Nota

Profesor Guía : Sr. Gonzalo Paredes V.

6.0

Profesor Informante : Sra. Alicia Ortega Z.

6.5

Profesor. Informante : Sr. Guillermo Trincado V.

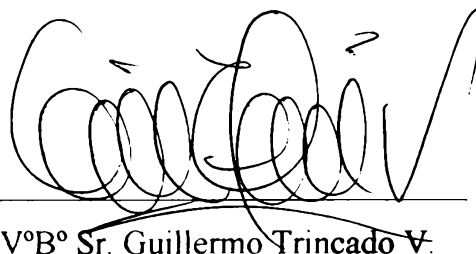
6.6



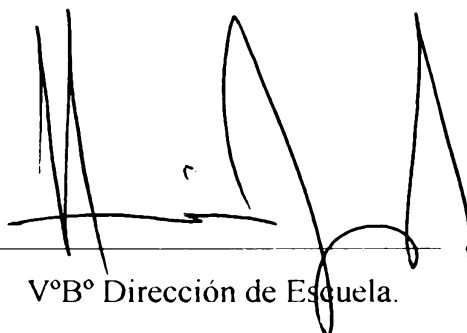
V°B° Sr. Gonzalo Paredes V.



V°B° Sra. Alicia Ortega Z.



V°B° Sr. Guillermo Trincado V.



V°B° Dirección de Escuela.

AGRADECIMIENTOS

¡ GRACIAS POR MONTONES!

Primero que nada y antes que todos, al AMOR total, PACIENCIA infinita y apoyo incondicional de VÍCTOR SÁEZ LUENGO, mi padre.

A Gonzalo Paredes, profesor guía y amigo, él que ayudo en gran medida a que este andar llegara a buen termino. Gracias por el apoyo y tiempo entregados.

A Alicia Ortega, profesor informante, por sus sonrisas y cooperación.

A Guillermo Trincado, por su disposición como profesor informante.

En la lejanía, a Claudio Torrubiano, por su tiempo y valiosa ayuda.

A la POLYTA de mi ♥, por su inmenso apoyo, amor y especialmente por el ánimo y confianza que me dio en los momentos difíciles.

A mamá, por la comprensión, suaves consejos y la gran capacidad de escuchar.

A Paz Ovalle, mi AMIGA con mayúscula, por ayer, hoy y mañana. Mil gracias.

También a Ti, Arturo querido, por las alegrías, penas y buenos momentos.

*A los de mi HOGAR: ¡¡¡ ESTANCILLA Y LA DESOORDEN TODAS!!!
especialmente a ti Pelao mío, y a todos los que en uno u otro momento fueron parte de ellas. Agradezco también la dulzura, compañía y calor de hogar de la honorable Calola.*

Y por supuesto a una gran mujer, MI ABUELA AMELIA, por haberme impulsado a seguir. Donde quiera que estés TE AMO.

*Para todos ellos y aquellos que se encuentren dormidos
en mi memoria vayan las flores y alegrías
más hermosas del jardín de mis sueños.*

Anita

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
3	MATERIAL Y MÉTODO	13
3.1	Material	13
3.1.1	Datos	13
3.1.2	Estadígrafos básicos de la base de datos	14
3.1.3	Nomenclatura usada en las variables dasométricas del estudio	14
3.1.4	Modelos de ahusamiento	15
3.2	Método	22
3.2.1	Revisión, localización de errores y depuración de la base de datos original	22
3.2.1.1	Criterios utilizados para la revisión y localización de errores	22
3.2.1.2	Pauta utilizada para la corrección de errores	23
3.2.2	Construcción del archivo de trabajo depurado	24
3.2.3	Ajuste y análisis comparativo de los modelos de ahusamiento y de volumen	24
3.2.3.1	Evaluación de las bondades de ajuste de los modelos de ahusamiento y de volumen	25

Capítulo		Página
3.2.3.2	Evaluación de las bondades de predicción de los modelos de ahusamiento y de volumen	26
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	29
4.1	Resultados de la depuración de los datos y construcción de la base de datos del estudio	29
4.2	Estadígrafos básicos	30
4.3	Resultado del ajuste de los modelos de volumen	31
4.4	Resultado del ajuste de los modelos de ahusamiento	34
4.4.1	Validación de diámetros	35
4.4.2	Validación de alturas.	43
4.4.3	Validación de volumen	49
5	CONCLUSIONES	52
6	RESUMEN	54
	SUMMARY	55
7	BIBLIOGRAFÍA	56
	ANEXOS	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de diámetros y alturas	28
2	Estadígrafos básicos del archivo de datos original	30
3	Estadígrafos básicos del archivo de datos depurado	30
4	Resultado del ajuste de los modelos de volumen	31
5	Resultado evaluación de la bondad de ajuste de los modelos de volumen	32
6	Resultados evaluación bondad de predicción de los modelos de volumen	32
7	Resultados del ajuste de los modelos de ahusamiento	34
8	Resultados evaluación de la bondad de predicción para las estimaciones de diámetros en el total del fuste	35
9	Sesgo, error y posición en el ranking de los modelos recomendados en la validación de diámetros	42
10	Resultados evaluación de la bondad de predicción para las estimaciones de alturas en el total del fuste	43
11	Sesgo, error y posición en el ranking de los modelos recomendados en la validación de alturas	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Series de diámetro-altura para cada árbol del conjunto de datos depurado	29
2	Diferencia agregada por clases diamétricas para las estimaciones de diámetros de los modelos de Bruce, Kozak y Pérez	37
3	Raíz del error medio cuadrático por clases diamétricas para las estimaciones de diámetros de los modelos de Bruce, Kozak y Pérez	38
4	Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de diámetros de los modelos evaluados en la validación de diámetros	40
5	Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de diámetros de los modelos evaluados en la validación de diámetros	41
6	Diferencia agregada por clases diamétricas para las estimaciones de alturas de los modelos de Kozak, Pérez y Torrubiano	45
7	Raíz del error medio cuadrático por clases diamétricas para las estimaciones de alturas de los modelos de Kozak, Pérez y Torrubiano	45

Figura		Página
8	Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de alturas de los modelos evaluados en la validación de alturas	46
9	Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de alturas de los modelos evaluados en la validación de alturas	47
10	Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de volumen de los modelos de Kozak y Pérez	50
11	Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de volumen de los modelos de Kozak y Pérez	51

1. INTRODUCCIÓN.

Por muchos años el sector forestal chileno concentra parte importante de su producción en las plantaciones de pino insigne (*Pinus radiata* D.Don) existentes en el país, las que a la fecha de hoy cubren aproximadamente un millón cuatrocientas mil hectáreas (INFOR-CORFO, 1996); esto debido al rápido crecimiento y a las ventajas comparativas que esta especie proporciona. Actualmente dado el acelerado crecimiento a que está enfrentado el sector hace necesario aprovechar las ventajas que otorgan otras especies introducidas como es pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)), que a pesar de no presentar tasas de crecimiento tan altas como las del pino insigne, presenta otras ventajas de interés en lo que se refiere a la plasticidad de la especie, propiedades físico-mecánicas de su madera y a los precios con los que se transan sus productos en el mercado externo (UN, 1985 citado por Aguirre y Wrann, 1989).

Pino oregón es una especie originaria de América del Norte, que se extiende a lo largo de la costa del Pacífico, al oeste de las Montañas de las Cascadas, desde Columbia Británica, en Canadá, hasta California central en Estados Unidos (variedad *menziesii*) y a lo largo de ambos costados de la Montañas Rocallosas de la Columbia Británica y Alberta hasta México (variedad *glauca*) (INFOR-CORFO, 1986). Esta especie se desarrolla en climas templados y húmedos, con precipitaciones de régimen invernal, de las cuales un 30% se concentran en primavera y verano. La precipitación media fluctúa alrededor de los 1400 mm anuales y la temperatura promedio anual varía entre los 7°C y 13°C (Fowells, 1965; citados por Grosse y Kannegiesser, 1988). Los suelos en que esta especie se

desarrolla son principalmente de tipo sedimentario y en algunos casos de origen volcánico, con pH ácidos que fluctúan entre 4.5 y 6.5.

Hasta diciembre de 1995 las plantaciones de pino oregón ocupaban en nuestro país alrededor de 12.477 hectáreas, superficie que en su mayoría se concentra en la novena y décima regiones (INFOR-CORFO, 1996). En los últimos años, la tendencia a reforestar o forestar con esta especie ha aumentado (Díaz-Vaz y Ojeda, 1980), lo que crea la necesidad de contar con información apropiada, de manera de realizar un manejo adecuado del recurso.

Parte de esta información la constituye el estimar el volumen total a obtener de la especie en un determinado rodal, lo que generalmente se obtiene mediante el uso de ecuaciones que predicen el volumen total de un árbol a partir de variables como el diámetro a la altura del pecho, altura (comercial o total), y en algunos casos haciendo uso de alguna medida de forma u otro tipo de diámetro. En la actualidad existen una gran variedad de productos rollizos que se extraen del bosque, por lo que el predecir volúmenes comerciales o hasta diferentes índices de utilización es materia de gran importancia en el manejo forestal.

La estimación de volúmenes a diferentes índices de utilización (volúmenes comerciales) por mucho tiempo se realizó a través del uso de las funciones de estimación de volumen como las anteriormente descritas, las que eran desarrolladas para cada índice de utilización o estándar específico. Por lo que era necesario ajustar tantos modelos, como índices de utilización era necesario definir, dando origen a una ecuación de volumen para un índice de utilización dado, la que era válida mientras este índice no cambiara.

Otros procedimientos alternativos para la estimación de volúmenes a diferentes diámetros límites son: las mediciones directas, los modelos de volumen de razón y las funciones de ahusamiento. Estas últimas, también conocidas como modelos fustales, son funciones que representan la variación diamétrica a lo largo del fuste, es decir, permiten estimar el diámetro del fuste a una altura dada o la altura del fuste a un diámetro dado, esto en función de variables de fácil medición como el diámetro a la altura del pecho, altura total, etc.. También es posible obtener, por medio de la integración de estas funciones entre los límites requeridos, el volumen total o comercial, información de gran utilidad en las labores de inventarios forestales con esquemas de trozados predeterminados.

Finalmente las funciones de ahusamiento son una herramienta de gran utilidad en las áreas de mensura y manejo forestal, por lo que el trabajo aquí realizado tiene como **objetivos generales:**

- Entregar información necesaria para un mejor manejo futuro de la especie *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.).
- Generar una herramienta de utilidad en el área de mensura y manejo forestal de bosques de pino oregón.

y como **objetivos específicos:**

- Ajustar y estudiar comparativamente los modelos de ahusamiento fustal escogidos para este estudio.
- Calcular y evaluar para cada uno de ellos sus bondades de ajuste y predicción.

- Validar cada uno de los modelos ajustados y establecer un ranking comparativo de las respectivas bondades de ajuste y predicción.
- Proponer un modelo de ahusamiento fustal que proporcione estimaciones consistentes , estables y confiables, para bosques de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) existentes en la Provincia de Valdivia.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El manejo intensivo que hoy se le da a las plantaciones de especies introducidas en nuestro país requiere mejorar la información acerca de la distribución y características de la materia prima proveniente de los bosques.

En la actualidad la multiplicidad de procesos industriales para los cuales la madera es materia prima hace necesario dividir el fuste en diferentes trozas, las que serán, por separado, insumos de diferentes procesos industriales, consiguiendo con esto, un uso integral del fuste, de manera de maximizar los ingresos y satisfacer la demanda actual de los diversos productos.

De lo anterior se desprende una tendencia a desagregar la información proveniente de estos bosques, según los diferentes tipos de productos a obtener. Es decir, hoy en día la información de volumen total y aserrable no son suficiente para un manejo óptimo de los bosques, sino que es necesario, debido a los variados objetivos de manejo forestal existentes, la estimación de productos rollizos de diversas dimensiones. De aquí que las estimaciones de volúmenes hasta distintos índices de utilización o diámetros límites sea rutina en la descripción cuantitativa del recurso forestal.

En el pasado, cuando los estándares comerciales eran relativamente estables, la metodología empleada en la determinación de volúmenes comerciales hasta distintos diámetros límites, consistía en ajustar un conjunto de ecuaciones de volumen independientes para cada índice de utilización (Reed y Green, 1984) Es decir, se desarrollaban tantas funciones de volumen como diámetros límites eran

preciso definir, los que en la práctica eran válidos mientras éstos no cambiaran. Dado que en la actualidad los estándares están en constante evolución, esta labor se torna poco práctica y engorrosa (Czaplewski et al., 1989 citado por Torrubiano, 1994). Cao et al. (1980) agrega: “cuando se ajustan independientemente ecuaciones para predecir diferentes volúmenes comerciales, se produce una intercepción ilógica entre las superficies las curvas dentro de un mismo conjunto de datos”, lo que se traduce en estimaciones inconsistentes de diferentes volúmenes comerciales en un único fuste, constituyendo esto un problema de tipo estadístico.

Byrne y Reed (1986) sostiene que los inventarios forestales pueden ser mucho más eficientes si se usan sistemas de ecuaciones para predecir el volumen total y comercial para cualquier índice de utilización. Tales ecuaciones pueden ser usadas tanto para estimar diámetro a cualquier altura, como altura a cualquier diámetro, y están basadas en variables de fácil medición. La predicción del volumen a cualquier límite comercial ha sido materia ampliamente estudiada, surgiendo así, procedimientos alternativos para la estimación de volúmenes a diferentes diámetros límites, y estos son: los modelos de volumen de razón y las funciones de ahusamiento.

Los denominados modelos de volumen de razón corresponden a ecuaciones generadas de la combinación de funciones de volumen general de variables tradicionales y modelos que estiman la razón entre el volumen comercial y total (Honer, 1969 y Burkhart, 1977; citados por Byrne y Reed, 1986), siendo posible de esta manera predecir volumen hasta cualquier índice de utilización.

El otro procedimiento, y en la actualidad más utilizado, es el de las funciones de ahusamiento, también conocidas como modelos fustales, los que representan la variación diamétrica a lo largo del fuste, es decir, permite estimar el diámetro del

fuste a una altura dada en función de variables de fácil medición como el diámetro a la altura del pecho, altura total, etc.. Estas funciones de ahusamiento al igual que las funciones generatrices de sólidos de revolución dan origen a una serie de otros parámetros de importancia, como lo son la altura a cualquier diámetro límite, el volumen total o comercial, los que se obtienen por integración de la función entre los límites requeridos.

El ahusamiento o tasa de disminución del diámetro a medida que se aumenta la altura de los árboles (Gray, 1956; citado por Muhairwe et al., 1994), es ampliamente reconocido como un factor importante en la exactitud de las estimaciones de los inventarios forestales. Esto se refleja en textos de mensura e inventarios forestales como Spurr (1955) y Husch et al. (1972) citados por Ormerod (1986), los que desarrollan y usan variados métodos para modelar el ahusamiento de los árboles. Algunos de éstos son los conocidos como factores y cuocientes de forma, los que en la actualidad no son de tanta importancia, ya que no permiten estimar volúmenes en diferentes secciones de los árboles. (Ormerod, 1986)

A consecuencia de lo anterior se comienzan a desarrollar las curvas de ahusamiento anteriormente descritas. En los últimos 80 años muchos modelos empíricos han mostrado ventajas al describir el perfil de los árboles, produciéndose una evolución de los modelos propuestos, pasando desde el uso de funciones simples a funciones de mayor complejidad. El primero de estos modelos empíricos lo constituyó la ecuación logarítmica de Hojer ampliamente utilizada en Escandinavia (Ormerod, 1986). Posteriormente Behre (1923, 1927; citados por Ormerod, 1986) probó la ecuación de Hojer, y encontró que ésta no se ajustaba bien a las especies de América, desarrollando una expresión matemática de tipo hiperbólico, la que entregó mejores resultados. Las ecuaciones anteriores

corresponden a **funciones de ahusamiento simples**, en las que una única ecuación describe todo el fuste.

Kozak (1988) da a conocer las ventajas y desventajas de modelar el perfil del árbol con funciones simples. Las ventajas son:

- facilitar los procesos de ajuste,
- generalmente se integran fácilmente de manera de estimar los volúmenes, y
- se reordenan con rapidez para el cálculo de alturas comerciales.

La única y principal desventaja que Kozak destaca es que presentan un sesgo significativo en las estimaciones de diámetros, tanto en la base como en otras porciones del fuste. Sterba (1980; citado por Biging, 1984), afirma que algunos de estos modelos no son capaces de modelar correctamente la porción basal de los árboles, presentando un significativo engrosamiento en la parte baja del fuste.

A pesar de la desventaja que estas funciones presentaban, la idea de una función simple que describiera todo el fuste persistía, es así como Bruce et al. (1968) propone un polinomio de alto grado, y como él, según Muhairwe et al. (1994), se podrían mencionar los modelos propuestos por Matte (1949), Gray (1956), Osumi (1959), Kozak et al. (1969) y Amidon (1984).

Más tarde se comenzaron a desarrollar las **funciones de ahusamiento compatibles**, las que corresponden a funciones de ahusamiento simples que entregan estimaciones del volumen total que coinciden con las estimaciones entregadas por una función de volumen determinada. Los primeros en probar este tipo de funciones fueron Demaerschalk (1971, 1972) y Goulding y Murray (1976).

Demaerschalk (1972) concluyó, luego de probar las funciones simples de ahusamiento más representativas en esos momentos (Behre, 1923; Matte, 1949; Bruce et al., 1968; etc.) que presentaban errores considerables en ciertas porciones del fuste, lo que confirmaba el uso de las funciones compatibles.

La seguridad y precisión de las estimaciones de volumen derivadas de las funciones de ahusamiento depende directamente de cuan bien se ajuste la ecuación al perfil del árbol. Por lo que parece lógico que la ecuación ajustada modele de la mejor manera posible el fuste, de manera de obtener estimaciones lo más cercanas a la realidad (Byrne y Reed, 1986). Es así como Petrini (1921), Petterson (1927) y Heijbel (1928) (citados por Ormerod, 1986) fueron los primeros en proponer modelos de ahusamiento separados para diferentes secciones del fuste, lo que más adelante se conocería como **funciones de ahusamiento segmentadas**. Éstas describen cada sección del fuste con ecuaciones separadas; dado que, por más compleja que fuesen las funciones simples, igual las estimaciones de volumen mostraban sesgos en algunas de las secciones del árbol, ya que, es extremadamente difícil lograr que una única ecuación se ajuste correctamente a todo el fuste. De esta manera se propusieron diferentes modelos para las distintas partes del árbol, los que eran unidos con la condición que las funciones se conectaran correctamente en los puntos de unión para formar un modelo segmentado. Heijbel (1928) citado por Ormerod (1986), revisó las ecuaciones de Petrini y Petterson y concluyó que sus resultados eran errados, proponiendo un sistema de tres submodelos, el que requería mediciones adicionales además de una constante única para cada categoría particular de copa. Grosenbaugh (1966; citado por Ormerod, 1986), ratificó la idea de que el perfil de los árboles era mejor modelado en secciones. Además indicó que los submodelos debían estimar diámetros idénticos en los puntos de conexión de éstos, existiendo un decrecimiento de los diámetros desde la base al ápice del árbol.

Más tarde, y retomando los trabajos de Heijbel, Ormerod (1973) propuso un modelo que asimilaba un cambio en el perfil de árbol, por lo que estaba constituido por dos submodelos de funciones simples. En esta misma dirección Max y Burkhardt (1976), Matney y Sullivan (1980) y Demaerschak y Kozak (1977), citados por Biging (1984), usando ecuaciones polinomiales segmentadas afirmaron la superioridad de aquellas compuestas por tres submodelos sobre las formadas por dos.

Larson (1963) había dado a conocer que el fuste de los árboles debería tener el punto de inflexión o de cambio en su perfil, el que coincidía con el cambio de la tasa de crecimiento en diámetro a medida que aumentaba la altura. Ampliado el conocimiento en relación a este tipo de modelos de ahusamiento segmentados, Cao et al. (1980) probó los modelos ya mencionados agregando un nuevo modelo segmentado basado en el polinomial propuesto por Goulding y Murray (1976), concluyendo también que el uso de tres submodelos era la mejor aproximación para modelar el perfil del fuste (Ormerod, 1986).

Estudios recientes han mostrado que ecuaciones de ahusamiento complejas, tales como las ecuaciones segmentadas, entregan un mejor ajuste al perfil del fuste, que las ecuaciones de ahusamiento simples, especialmente en la parte superior de los árboles (Byrne y Reed, 1986). Según Kozak (1988), este tipo de modelo tiene la ventaja de disminuir el sesgo de las estimaciones con respecto a las entregadas por las funciones de ahusamiento simples, pero por otro lado presentan la desventaja de que sus parámetros son de difícil estimación y las expresiones para el cálculo de volúmenes y alturas comerciales no son posibles obtener, o su derivación es compleja.

Las aproximaciones del perfil del fuste que entregan las funciones hasta ahora descritas no consideran las condiciones en las que crecen los árboles en estudio, lo que afecta directamente el ahusamiento de éstos. Larson (1963, 1965) y Smith y Wilsie (1961), citados por Muhairwe et al. (1994), sostienen que: “generalmente, la variación en el ahusamiento de los árboles es causado por diferencias de rodal, árbol, características de sitio, como también, la historia del rodal”. Larson (1963) agrega, que muchas de las variaciones en la forma del fuste son atribuidas a cambios en el tamaño de la copa, distribución de la copa viva a lo largo del fuste y largo del fuste libre de nudos. Mckinney (1973), Dell et al. (1979), Feduccia (1979), Burkhart y Walton (1985) y Walters y Hann (1986), citados por Hann et al. (1987); Ormerod (1986) y Real (1989), citados por Torrubiano (1994), realizaron estudios que incorporaron la altura de la copa viva o razón de copa, como variable que estaba en relación directa con las condiciones de crecimiento de los árboles, además según estudios anteriores recopilados por Gray (1956) y Larson (1963), y citados por Hann et al. (1987), queda en evidencia que las tasas de crecimiento debajo de la copa son menores que aquellas dentro de la copa. Por lo tanto al incorporar esta razón se capta esa diferencia, además de variar las estimaciones entregadas cuando el largo de copa viva cambie, es decir, cuando las condiciones de crecimiento varíen. Estos modelos que incorporan una tercera variable presentan según Burkhart y Walton (1985) la desventaja que no reducen la suma de cuadrados residuales de la ecuación de ahusamiento.

La variación de la forma del fuste según Larson (1963) dificulta la formulación de reglas generales fácilmente aplicables a una especie única o bien a todos los fustes de un rodal determinado. Por lo que estudios recientes realizados por Byrne y Reed (1986); Neewberry y Burkhart (1986); Newnham (1988) y Kozak (1988), citados por Pérez et al. (1990) y Newnham (1992) introdujeron las

funciones de ahusamiento de forma variable, las que describen el ahusamiento de los árboles con una función continua usando el cambio de exponente para compensar los cambios de forma en las distintas secciones del fuste (Pérez et al., 1990).

El estudio de Kozak (1988) demostró que la forma del fuste puede ser descrita con errores muy pequeños, desde el nivel del suelo hasta el ápice, haciendo cambios continuos de exponentes de una función simple. Por su parte Pérez et al. (1990), concluye que los modelos de ahusamiento de forma variable poseen al igual que el resto de los modelos de ahusamiento dos desventajas básicas: (1) deben ser usados métodos de integración numérica para el cálculo de volumen total y comercial; y (2) son necesarios métodos iterativos para encontrar la altura comercial para un diámetro dado.

Todas las funciones de ahusamiento antes descritas pueden ser ajustadas de diferentes maneras, una de ellas es la que da origen a **funciones de ahusamiento generales**, en la que la función se ajusta a toda la muestra resultando una ecuación única aplicable a toda la población. Otro método de ajuste es el que da origen a las llamadas **funciones de ahusamiento de árboles individuales** (Coffré, 1983). En este caso se ajusta una ecuación dada a cada árbol, obteniéndose así para cada uno de ellos coeficientes diferentes con los que se construye una matriz de coeficientes y usando variables del árbol, rodal y ambiente se ajusta un sistema de ecuaciones que estima los coeficientes del modelo de ahusamiento considerando los coeficientes individuales de cada árbol (Real, 1986; citado por Torrubiano, 1994).

3. MATERIAL Y MÉTODO.

3.1 MATERIALES.

3.1.1 Datos.

La base de datos utilizada para este estudio proviene de información recopilada por el CEFOR (Centro Experimental Forestal), organismo encargado de la administración del patrimonio forestal de la Universidad Austral de Chile, en abril y mayo de 1989, en rodales puros de pino oregón que se encuentran en los predios de Las Palmas, San Germán, Santa Rosa y Los Pinos pertenecientes a la Universidad Austral de Chile y que se ubican en los alrededores de Valdivia.

Esta base de datos consta de 180 árboles, a cada uno de los cuales se le midió las siguientes variables dasométricas:

- Diámetro con corteza a la altura del pecho.
- Diámetro sin corteza a la altura del pecho.
- Diámetro del tocón.
- Altura total del árbol.
- Diámetro de la sección i -ésima con corteza.
- Diámetro de la sección i -ésima sin corteza.
- Altura de la sección i -ésima.

Las mediciones de las últimas tres variables dasométricas mencionadas, correspondientes a las diferentes secciones del árbol, se realizaron dividiendo el

fuste en secciones regulares de un metro de longitud y se encuentran ordenadas desde las tomadas a la altura del tocón, hasta las correspondientes al extremo superior del árbol, la punta.

3.1.2 Estadígrafos básicos de la base de datos.

La base de datos antes mencionada se caracterizó con el cálculo de estadígrafos básicos de las variables a usar en el estudio. En esta ocasión los estadígrafos calculados para las variables dasométricas ya individualizadas fueron:

- Valor Mínimo.
- Valor Máximo.
- Valor Medio.
- Desviación Estándar.
- Coeficiente de Variación.

3.1.3 Nomenclatura usada en las variables dasométricas del estudio.

A continuación se presenta la nomenclatura que se usó sistemáticamente para indicar las variables dasométricas usadas en el estudio.

- **DAPCC** = Diámetro con corteza medido a 1.3 metros desde el suelo, en centímetros.
- **DAPSC** = Diámetro sin corteza medido a 1.3 metros desde el suelo, en centímetros.
- **DT** = Diámetro del tocón medido a 0.3 metros desde el suelo, en centímetros.

- **HT** = Altura total del árbol desde el suelo, en metros.
- **Hi** = Altura medida a “i” metros desde la base, en metros.
- **Dicc** = Diámetro con corteza medido a la altura **Hi**, en centímetros.
- **Disc** = Diámetro sin corteza medido a la altura **Hi**, en centímetros.
- **Vol** = Volumen total sin corteza, en metros cúbicos.

3.1.4 Modelos de ahusamiento.

Existen varios métodos alternativos de construcción de modelo de ahusamiento fustal; por un lado, los modelos pueden ser ajustados dando origen a funciones de ahusamiento generales, por otro, podrían ajustarse de modo de obtener las llamadas funciones de ahusamiento para árboles individuales, como también pudieran ajustarse diversas funciones dentro de un mismo árbol, dependiendo de la forma, dando origen a los llamados modelos de ahusamiento fustal segmentados. Los modelos más recientes ajustan al perfil de los árboles una única función simple que con continuos cambios de su exponente compensa los cambios de forma de los fustes (modelos de forma variable).

Actualmente el método más común para el desarrollo de modelos de ahusamiento fustales, es aquel que da origen a funciones de ahusamiento generales cuyos resultados indican que éstos proporcionan buenas estimaciones del diámetro a lo largo de la parte central del fuste, no siendo capaces de describir apropiadamente las secciones extremas, debido fundamentalmente a que no son suficientemente flexibles para adaptarse a las fuertes variaciones que a veces ocurren dentro del perfil de estas secciones. Producto de lo anterior surge la idea de probar el ajuste de modelos más complejos que entreguen estimaciones más confiables.

El problema en esta etapa del estudio radica, no en el ajuste propiamente tal, sino mas bien en la elección de los modelos a evaluar, que en un estudio como el presente constituye un tema de importancia primordial. M'Hirit y Postaire (1985) recalcan que la elección de la forma analítica del modelo paramétrico es siempre un problema crítico sin solución satisfactoria, además agregan que en casos donde a priori hay poco conocimiento de la naturaleza de los perfiles, el supuesto de una forma paramétrica particular puede llevar a resultados poco satisfactorios, y en vez de describir el perfil éste impondrá un perfil a la muestra de trabajo. Razón por la cual, lo ideal será intentar con varias funciones de modo de apreciar cuál de ellas es la que entrega los mejores resultados.

Para el presente estudio se seleccionaron las siguientes ecuaciones que corresponden a funciones de ahusamientos elegidas desde la literatura, considerando los resultados que hasta ahora éstas han mostrado. Cabe aclarar que en Chile al momento de la elección de los modelos a evaluar no existían funciones de ahusamiento ajustadas para la especie en estudio, por lo que la elección de las funciones se realizó en base a los resultados que han tenido los modelos ajustados para la especie pino insigne en nuestro país, más otros que según la literatura eran recomendables.

Los modelos planteados para este estudio son los siguientes:

MODELOS GENERALES.

Modelo de Bruce. (1968)

$$Y_B = B_1 * Xb + B_2 * Xb_2 + B_3 * Xb_3 + B_4 * Xb_4 + B_5 * Xb_5 + B_6 * Xb_6 [1]$$

donde $X = ((HT-H_i)/(HT-1.3m))$

$$Y_B = (Disc/DAPCC)^2$$

$$Xb = X^{3/2}$$

$$Xb_2 = (Xb - X^3) DAPCC$$

$$Xb_3 = (Xb - X^3) HT$$

$$Xb_4 = (Xb - X^{32}) HT DAPCC$$

$$Xb_5 = (Xb - X^{32}) HT^{1/2}$$

$$Xb_6 = (Xb - X^{40}) HT^2$$

B_i = parámetros del modelo (i = 1,.....,6)

Modelo de Ormerod. (1973)

$$Y_O = B_1 X^{B_2}$$

donde $X = ((HT-H_i)/(HT-1.3m))$

$$Y_O = (Disc/DAPCC)$$

De manera de ajustar este modelo por medio de mínimos cuadrados fue necesario linealizarlo, quedando la siguiente expresión a ajustar:

$$\ln(Y_O) = B_0 + B_1 \ln(X) \quad [2]$$

Modelo de Goulding y Murray. (1976)

$$Y_{GM} = B_1 * X + B_2 * X^2 + B_3 * X^3 + B_4 * X^4 + B_5 * X^5$$

donde $X = ((HT-Hi)/HT)$

$$Y_{GM} = (Disc/DAPCC)^2$$

Para el ajuste de este modelo fue necesario contar con una función de volumen la que se eligió luego de ajustar a los datos las funciones de volumen que a continuación se detallan:

$$V = B_0 + B_1 DAPCC^2 HT \quad [VOL1]$$

$$V = B_0 + B_1 DAPCC + B_2 DAPCC^2 HT \quad [VOL2]$$

$$V = B_0 + B_1 HT + B_2 DAPCC^2 HT \quad [VOL3]$$

$$V = B_0 + B_1 DAPCC^2 + B_2 HT + B_3 DAPCC^2 HT \quad [VOL4]$$

$$\ln(V) = B_0 + B_1 \ln(DAPCC) + B_2 \ln(HT^2/(HT-1.3)) \quad [VOL5]$$

De modo que el volumen obtenido al integrar este modelo fuera compatible con el obtenido a partir de la ecuación de volumen ajustada a la base de datos, fue necesario modificar la expresión antes mencionada; obteniéndose la siguiente expresión para ser ajustada:

$$(Disc^2 KHT/V-2X) = B_1 (3X^2-2X) + B_2 (4X^3-2X) + B_3 (5X^4-2X) + B_4 (6X^5-2X). \quad [3]$$

donde, $K =$ Constante que multiplicada por el $DAPCC^2$ entrega el área basal en m^2 . ($K = 0,00007853981$)

$V =$ Volumen estimado a través de una función de volumen.

MODELOS SEGMENTADOS.

Modelo de Max y Burkhardt. (1976)

$$Y_{MB} = B_1 * (X-1) + B_2 * (X^2-1) + B_3 * (A_1-X)^2 I_1 + B_4 * (A_2-X)^2 I_2 \quad [4]$$

donde, $X = H_i/HT$

$$Y_{MB} = (\text{Disc}/\text{DAPCC})^2$$

$$I_1 = 1 \text{ si } X > A_1, \text{ entonces } I_1 = 0$$

$$I_2 = 1 \text{ si } X < A_2, \text{ entonces } I_2 = 0$$

MODELOS DE FORMA VARIABLE.

Modelo de Kozak. (1988)

$$Y_k = X^c$$

donde, $Y_k = (\text{Disc}/\text{DI})$

$$X = (1 - \text{SQRT}(Z))/(1 - \text{SQRT}(I))$$

DI = Diámetro sin corteza en el punto de inflexión.

I = Localización punto de inflexión. (I = 0,2)

$$Z = (H_i/HT)$$

Para efectos de este modelo y basándose en los trabajos realizados por Demaerschalk y Kozak (1977) y Pérez et al. (1990) el punto de inflexión se mantuvo constante a un 25 % de la altura total, y la estimación de c y del diámetro sin corteza en el punto de inflexión fue:

$$c = B_3 * Z^2 + B_4 * \ln(Z + 0,001) + B_5 * (Z)^{1/2} + B_6 e^Z + B_7 * (DAPCC/HT)$$

$$DI = B_0 * DAPCC^{B_1} * B_2^{DAPCC}$$

Si se reemplaza en el modelo los valores de c y DI y en seguida si linealiza, se obtiene la siguiente expresión a ajustar:

$$\begin{aligned} \ln(\text{Disc}) = & \ln B_0 + B_1 \ln(DAPCC) + \ln B_2(DAPCC) + B_3 \ln(X) Z^2 + B_4 \ln \\ & (X) * \ln(Z + 0,001) + B_5 \ln(X) Z^{1/2} + B_6 \ln(X) e^Z + B_7 \ln \\ & (X) * (DAPCC/HT). \end{aligned} \quad [5]$$

Modelo de Pérez. (1990)

$$\text{Disc} = B_0 DAPCC^{B_1} X^c$$

$$\text{donde, } c = B_2 * Z^2 + B_3 * \ln(Z + 0,001) + B_4 * (DAPCC/HT)$$

$$X = (1 - \text{SQRT}(Z)) / (1 - \text{SQRT}(I))$$

$$Z = (H_i/HT)$$

Linealizando luego de reemplazar el valor de c en el modelo (Pérez et al., 1990) se tiene:

$$\begin{aligned} \ln(\text{Disc}) = & \ln(B_0) + B_1 \ln(DAPCC) + B_2 \ln(X) Z^2 + B_3 \ln(X) \ln \\ & (Z + 0,001) + B_4 \ln(X) (DAPCC/HT). \end{aligned} \quad [6]$$

Modelo de Newnham. (1992)

$$Y_N = X^{1/(\exp(\ln(K)))}$$

$$\begin{aligned}\text{donde, } X &= ((HT-Hi)/(HT-1.3m)) \\ Y_N &= (Disc/DAPSC)\end{aligned}$$

La variable dependiente se modificó de manera de trabajar con el diámetro a la altura del pecho con corteza. ($Y_N = Disc/DAPCC$)

$$\begin{aligned}\ln(K) = B_0 + B_1 X + B_2 (DAPCC/HT)^2 + B_3 X^2 (DAPCC/HT) + B_4 (HT/Hi)^{1/2} \\ + B_5 DAPCC (HT/Hi).\end{aligned}\quad [7]$$

Modelo de Torrubiano. (1994)

$$Y_N = X^{1/(\exp(\ln(K)))}$$

$$\begin{aligned}\text{donde, } X &= ((HT-Hi)/(HT-1.3m)) \\ Y_N &= (Disc/DAPCC)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\ln(K) = B_0 + B_1 X + B_2 X^6 + B_3 (DAPCC/HT) + B_4 (HT^2/Hi) + B_5 \\ (HT/Hi)^{0.5}.\end{aligned}\quad [8]$$

3.2 MÉTODO.

3.2.1 Revisión, localización de errores y depuración de la base de datos original.

En esta etapa del estudio se procedió a una revisión, detección y depuración minuciosa de la base de datos original, de modo de identificar posibles errores en los datos, haciendo posible su corrección o eventual eliminación. Todo lo anterior con la finalidad de obtener una base de datos consistente y confiable, la que fue usada en los distintos procesos de ajuste y validación de los diversos modelos fustales en estudio.

3.2.1.1 Criterios utilizados para la revisión y localización de errores.

Los criterios utilizados en la revisión y localización de los posibles errores en la base de datos fueron:

a. Criterio de sección completa.

Por medio de este criterio se pretendió buscar aquellas secciones dentro de un árbol que les faltaba parte de la información requerida.

b. Criterio del árbol completo.

Este criterio tuvo como objeto buscar aquellos árboles que les faltaba el o los registros correspondientes a una sección o bien carecían de parte de la información general en relación con el árbol.

c. Criterio de consistencia de las mediciones.

A través de este último criterio se pretendió verificar la consistencia de las mediciones entre secciones de un mismo árbol, es decir, verificar un regular ahusamiento del árbol. Para realizar la verificación de este criterio se hizo uso del programa **Curvas** (Lardiez, 1991), el que una vez ingresado los datos de diámetros y altura de las secciones por árboles, procede a graficar los perfiles de todos ellos en una misma gráfica, permitiendo desplazarse a través de los perfiles pudiendo identificar visualmente y marcar aquellos árboles que presentaban algún tipo de anomalía en su ahusamiento.

3.2.1.2 Pauta utilizada para la corrección de errores.

A continuación se presenta un detalle de los posibles errores a detectar y sus posibles correcciones.

a. Faltan sólo mediciones de DAP.

En este caso el árbol será eliminado de la base de datos.

b. Faltan sólo las mediciones del extremo del fuste.

Cuando se presentó este tipo de error se agregó valor 0 tanto al diámetro con corteza como sin corteza y el valor de H_i será completado con el de H_T .

c. Faltan valores intermedios entre el DAP y el ápice.

En caso que algún árbol presentara este tipo de error era eliminado de la base de datos.

d. Errores en el ahusamiento de los árboles.

Este tipo de error esta asociado a los siguientes casos:

1. $DAPCC < DAPSC$
2. $D(i)_{cc} < D(i+1)_{cc}$
3. $D(i)_{sc} < D(i+1)_{sc}$
4. $HT < H_i$
5. $D_{icc} = 0$, si y sólo si $H_i \neq HT$
6. $D_{isc} = 0$, si y sólo si $H_i \neq HT$

Cuando se realizó detección de alguno de estos casos que se asocian a errores de ahusamiento regular se procedió a la revisión de los datos en los formularios originales, corrigiéndose éstos siempre y cuando correspondieran a errores de digitación.

3.2.2 Construcción del archivo de trabajo depurado.

Una vez finalizada la etapa de limpieza de la base de datos originales se procedió a la construcción, en base a los criterios y acciones antes mencionadas, del archivo de trabajo depurado; el que se estructuró de manera que facilite las labores posteriores de ajuste y validación.

3.2.3 Ajuste y análisis comparativo de los modelos de ahusamiento y de volumen.

En este estudio se empleo como técnica de ajuste de regresión lineal el método de mínimos cuadrados, para lo que fue necesario linealizar aquellos modelos que presentaran funciones no lineales y que fueran linealizables.

3.2.3.1 Evaluación de las bondades de ajuste de los modelos de ahusamiento y de volumen.

Para evaluar los distintos modelos ajustados y elegir el mejor ajuste, se compararon los distintos modelos basándose en su capacidad de ajustarse a los datos de la población. A partir de esto se construyó un ranking, en el que el modelo que obtuvo el número uno fue aquel modelo que presentó los mejores indicadores de bondad de ajuste.

La calidad de ajuste en este estudio se midió mediante los siguientes criterios:

a. Usando estadígrafos de bondad de ajuste.

Generalmente la bondad del ajuste se evalúa utilizando estadígrafos como el Coeficiente de Determinación (R^2) y el Error Estandar de la Estimación ($S_{x,y}$), que son de utilidad cuando se comparan modelos con igual variable dependiente (Y), lo que en este estudio no ocurre para todos los modelos, por lo que no fue posible hacer comparaciones directas de bondad de ajuste de una u otra función a través de estos estadígrafos. Por otro lado, Demaerschalk (1973) citado por Lowell (1986) señala que los estadísticos tradicionales como R^2 no son convenientes para evaluar las funciones de ahusamiento debido a que:

- no entregan la habilidad de la ecuación para ser integrada para la obtención del volumen .

- es más deseable contar con ecuaciones que entreguen buenas estimaciones en cada parte del fuste respecto a modelos que compensen sus errores para entregar un buen ajuste promedio.

Por lo anterior la bondad de ajuste de los modelos en estudio se determinó sólo para aquellos modelos que tenían la misma variable dependiente, y para los cuales es posible hacer comparaciones entre ellos. A éstos le fueron aplicados los criterios antes mencionados, presentando el ranking número uno aquel modelo que presentó los valores mejores de los estadígrafos de bondad de ajuste.

3.2.3.2 Evaluación de las bondades de predicción de los modelos de ahusamiento y de volumen.

La capacidad de predicción de los modelos en estudio se calculó utilizando como medidas de bondad de la predicción los siguientes estadígrafos:

a. Diferencia Agregada o Sesgo Medio como medida de sesgo.

$$DIFA = \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) / n$$

b. Raíz Cuadrada del Error Medio Cuadrático como medida de error.

$$REMC = \left(\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 / n \right)^{1/2}$$

c. Error Medio Absoluto como medida de error.

$$EMA = \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| / n$$

donde, O_i es un valor observado, E_i es un valor estimado y n es el número total de observaciones. La división de estos estadísticos por la media de los valores observados y su multiplicación por cien los transforma en los valores porcentuales necesarios para el análisis.

Esta etapa del estudio corresponde a la de validación de los modelos en estudio y se realizó primero para comprobar si las depuraciones y correcciones hechas a la base de datos originales influyen, mantienen o mejoran las estimaciones de las variables dependientes utilizadas normalmente en los ajuste de los modelos de ahusamiento fustal. Y segundo comprobar la capacidad que tiene el modelo para simular el comportamiento de la población modelada, aumentando así, la confianza en su habilidad para proporcionar información útil referente a alguna característica de la población donde se aplica.

Para los efectos de este estudio es importante destacar que la base experimental empleada para validar los modelos en estudio es la misma muestra usada en su construcción, esto es conocido como validación por replicación del modelo sobre su fuente. Este tipo de validación se realizó dado el tamaño reducido de la base de datos , la que no posee la información suficiente como para extraer una porción de ella para las labores de validación.

Por lo tanto, esta etapa consistió en tomar el mismo conjunto de datos utilizado para las labores de ajuste, los que se clasificaron en distintas clases de diámetro y de altura como se muestran en el cuadro 1.

Posteriormente se calcularon los estadígrafos indicadores de capacidad predictiva antes mencionados tanto para el total del fuste, clases de diámetros y alturas, como también, para porciones del fuste de igual dimensión; esto último para

apreciar además el comportamiento de los modelos en las distintas porciones del árbol.

CUADRO 1. Clasificación de diámetros y alturas.

Clases de Alturas (CH)	Clases de Diámetros (CD)						
	< 10,0	10,1 - 20,0	20,1 - 30,0	30,1 - 40,0	40,1 - 50,0	50,1 - 60,0	>60,0
< 5,0	11	21	31	41	51	61	71
5,1 - 10,0	12	22	32	42	52	62	72
10,1 - 15,0	13	23	33	43	53	63	73
15,1 - 20,0	14	24	34	44	54	64	74
20,1 - 25,0	15	25	35	45	55	65	75
25,1 - 30,0	16	26	36	46	56	66	76
30,1 - 35,0	17	27	37	47	57	67	77
35,1 - 40,0	18	28	38	48	58	68	78
>40,0	19	29	39	49	59	69	79

La metodología de trabajo de esta etapa del estudio, al igual que la etapa 4.2.3.1 se desarrolló de manera similar a la realizada por Cao et al. (1980). En este caso al examinar los diferentes modelos en términos de estimaciones de diámetros, alturas y volúmenes, obtuvo el primer lugar, aquel modelo que presentó el menor valor de diferencia agregada, de raíz cuadrada del error medio cuadrático y del error medio absoluto. Siendo, el modelo que se presentó en los mejores ranking de bondad de ajuste y de predicción, el con mayores probabilidades de ser recomendado al finalizar el estudio

Es importante explicar que en el caso de las estimaciones del volumen, éstas se realizaron utilizando las estimaciones de diámetro y altura entregadas por el modelo y mediante la fórmula de Smalian se obtuvieron los volúmenes estimados; esto de manera de hacer estrictamente comparables los volúmenes estimados con los observados. (Torrubiano, 1994)

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS DE LA DEPURACIÓN DE LOS DATOS Y CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS DEL ESTUDIO.

Luego de la depuración del archivo de datos originales usando los métodos ya expuestos, y mediante su empleo sistemático, el número de árboles muestreado disminuyó; constituyendo así un nuevo archivo de trabajo (169 árboles), con el que se realizaron las labores de ajuste y validación. En la figura 1 se pueden apreciar las series de diámetro-altura para cada árbol, esto último generado a partir del nuevo archivo de trabajo.

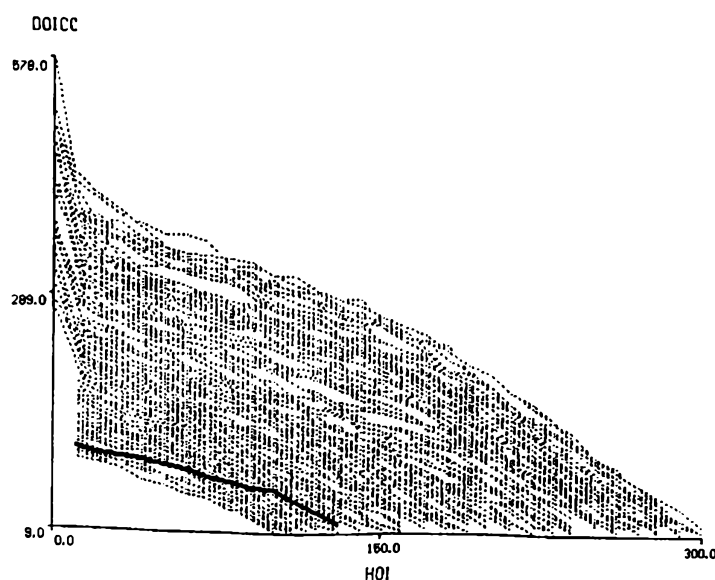


Figura 1. Series de diámetro-altura para cada árbol del conjunto de datos depurado.

4.2 ESTADÍGRAFOS BÁSICOS.

A continuación se presentan los estadígrafos básicos, tanto para el archivo de datos originales (cuadro 2), como los del archivo generado luego de su depuración (cuadro 3).

CUADRO 2. Estadígrafos básicos del archivos de datos original.

Número total de árboles: 180					
VARIABLES DASOMÉTRICAS	ESTADÍGRAFOS BÁSICOS				
	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estandar	Coef. Variación (%)
DAPCC (cm)	9,00	49,50	23,94	8,89	37,14
DAPSC (cm)	6,50	46,00	22,31	8,40	37,65
HT (m)	1,40	31,00	19,40	7,41	38,18
Hi (m)	0,02	31,00	10,80	7,70	71,28
Dicc (cm)	0,00	80,00	16,12	10,70	66,39
Disc (cm)	0,00	90,50	15,03	10,06	66,95

CUADRO 3. Estadígrafos básicos del archivos de datos depurado.

Número total de árboles: 169					
VARIABLES DASOMÉTRICAS	ESTADÍGRAFOS BÁSICOS				
	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estandar	Coef. Variación (%)
DAPCC (cm)	9,00	43,00	23,24	8,22	35,36
DAPSC (cm)	8,00	40,10	21,67	7,75	35,74
HT (m)	10,40	31,00	20,21	6,71	33,19
Hi (m)	0,02	31,00	10,74	7,66	71,35
Dicc (cm)	0,00	65,00	15,63	10,18	65,15
Disc (cm)	0,00	58,50	14,56	9,54	65,51
Vol (m)	0,03	1,61	0,45	0,41	90,15

Al observar el cuadro 2 es importante destacar la existencia de errores de digitación en la base de datos originales, los que fueron corregidos en la etapa de depuración. Esto queda reflejado en la altura total mínima (H_t), la que en la base de datos original (cuadro 2) era de 1,04m y luego de la depuración fue corregida quedando 10,4m (cuadro 3).

4.3 RESULTADO DEL AJUSTE DE LOS MODELOS DE VOLUMEN.

En esta etapa del estudio se ajustaron las funciones de volumen ya descritas, de modo de elegir la que mejor se ajuste al conjunto de datos. Siendo la función elegida, la necesaria para el posterior ajuste del modelo de ahusamiento de Goulding y Murray.

A continuación se presenta en el cuadro 4 los coeficientes de los cinco modelos de volumen evaluados.

CUADRO 4. Resultados del ajuste de los modelos de volumen.

MODELOS DEL ESTUDIO	COEFICIENTES			B_3
	B_0	B_1	B_2	
VOL1	0,01472	0,00003		
VOL2	-0,00462	0,00130	0,00003	
VOL3	-0,01779	0,00228	0,00003	
VOL4	-0,03977	0,00006	0,00314	0,00003
VOL5	-10,46901	1,94568	1,07286	

En el Anexo 1 se entrega un resumen con la información de interés de las salidas del paquete estadístico SYSTAT usado para el ajuste de los cinco modelos de volumen en estudio.

Una vez ajustados los modelos se realizó la evaluación de la bondad de ajuste y de predicción de cada uno de ellos, lo que se observa en los cuadros siguientes.

CUADRO 5. Resultados evaluación de la bondad de ajuste de los modelos de volumen.

MODELOS DEL ESTUDIO	CRITERIOS DE BONDAD DE AJUSTE	
	R^2	$S_{(x,y)}$
VOL1	0,984	0,05108
VOL2	0,984	0,05111
VOL3	0,985	0,05048
VOL4	0,985	0,05046
VOL5	0,993	

CUADRO 6. Resultados evaluación de la bondad de predicción de los modelos de volumen.

MODELOS DEL ESTUDIO	CRITERIOS DE BONDAD DE PREDICCIÓN		
	DIFA(%)	REMC(%)	EMA(%)
VOL1	-0,01152	11,28250	6,74995
VOL2	0,00671	11,26298	6,72326
VOL3	0,00461	11,09814	6,73529
VOL4	-0,00252	11,06578	6,69202
VOL5	-1,41177	20,44800	7,80536

En relación con la bondad de ajuste, al observar en el cuadro 5, se tiene que el modelo de volumen Vol5 no presenta el valor del error estandar de la estimación, esto debido a que este modelo no tiene la misma variable dependiente que los restantes (volumen y Ln(volumen)), por lo que no puede ser comparado por medio de este criterio con los otros modelos.

Los valores aquí presentados, tanto de coeficiente de determinación (R^2) como de error estandar de la estimación ($S_{x,y}$) de las diferentes funciones comparadas en esta etapa, denotan la competitividad de las cinco funciones, presentando todas valores muy similares, por lo que la elección del mejor modelo se realizó principalmente en base al análisis de los estadígrafos de bondad de predicción.

Al analizar estos cuadros es importante aclarar que los modelos de volumen que presentan los mejores comportamiento o son más competitivos, son aquellos que poseen los valores de error y sesgo menores. Al observar los resultados de la evaluación de la bondad de predicción de estos modelos (cuadro 6) queda en evidencia que las cuatro primeras funciones se presentan como las más competitivas, descartando el modelo de volumen Vol5, por presentar los valores de error y de sesgo mayores.

Por su parte el análisis de los valores de diferencia agregada, raíz del error medio cuadrático y error medio absoluto de las cuatro funciones restantes, entrega como resultado que el modelo de volumen Vol4 es el que ocupa el primer lugar en el ranking de modelos de volumen, presentando los menores valores de error y sesgo, seguido por el modelo Vol3.

Dado a lo expuesto anteriormente la función de volumen elegida para el ajuste del modelo de ahusamiento de Goulding y Murray es la siguiente:

$$V = -0,03976963 + 0,00005711 \cdot \text{DAPCC}^2 + 0,00313774 \cdot \text{HT} + 0,00002762 \cdot \text{DAPCC}^2 \cdot \text{HT}$$

4.4 RESULTADO DEL AJUSTE DE LOS MODELOS DE AHUSAMIENTO.

Luego de obtenida la función de volumen que mejor se ajustó al conjunto de datos del estudio y teniendo todas las herramientas necesarias, se procedió al ajuste de los modelos de ahusamiento. En el cuadro 7 se presentan de manera resumida los resultados obtenidos en los procesos de ajuste de los diferentes modelos en estudio (coeficientes).

CUADRO 7. Resultados del ajuste de los modelos de ahusamiento.

MODELOS ESTUDIO	COEFICIENTES							
	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇
BRUCE		0,87273	-0,01680	0,02973	0,00001	0,01596	-0,00023	
ORMEROD	0,01413	0,89632						
GOULDING y MURRAY		-13,37890	38,16950	-42,35590	16,48360			
MAX y BURKHART		1,51598	-1,20774	-0,03701	2,71155			
KOZAK	-0,14483	0,96241	0,00341	1,68185	-0,33488	2,82738	-1,43070	0,18932
PEREZ	-0,35482	1,04625	0,62687	-0,10724	0,21232			
NEWNHAM	0,31089	0,33627	-0,01168	-0,61029	-0,02376	0,00010		
TORRUBIANO	0,28657	0,06576	-1,09751	-0,15340	-0,00008	0,00942		

En el Anexo 2 se entrega un resumen con la información de interés de las salidas del paquete estadístico SYSTAT usado para el ajuste de estos modelos de ahusamiento.

4.4.1 Validación de diámetros.

En esta etapa del estudio se realizó el análisis comparativo de los estadígrafos de bondad de predicción de los modelos evaluados para las estimaciones de diámetro, tanto para el total del fuste, clases de diámetro-altura, como también, para porciones del fuste de igual dimensión. Esto último para apreciar además el comportamiento de los modelos en las distintas porciones del árbol.

El cuadro 8 entrega los resultados de la evaluación de la bondad de predicción para las estimaciones de diámetros en el total del fuste.

CUADRO 8. Resultados evaluación de la bondad de predicción para las estimaciones de diámetros en el total del fuste.

MODELOS DEL ESTUDIO	CRITERIOS DE BONDAD DE PREDICCION		
	DIFA(%)	REMC(%)	EMA(%)
BRUCE	-2,00119	9,21378	6,87297
ORMEROD	0,57121	13,25336	9,43928
GOULDING y MURRAY	-1,32246	13,14794	9,99009
MAX y BURKHART	-4,42096	16,61542	12,46729
KOZAK	-0,08425	9,14204	6,14667
PEREZ	0,19396	9,01470	6,18988
NEWNHAM	0,40616	10,80182	8,13576
TORRUBIANO	-0,82137	11,65447	7,42035

Analizando detenidamente los estadígrafos de bondad de predicción, éstos reflejan que los modelos de Goulding y Murray y Max y Burkhardt son los menos competitivos, presentando los mayores valores de error y sesgo. Por otro lado, Kozak, Pérez y Bruce, se encuentran entre los modelos con menores valores de

estos estadígrafos; presentándose como las mejores alternativas para realizar estimaciones de diámetros en el total del fuste los modelos de ahusamiento de Kozak y Pérez, mostrando éstos diferencias mínimas entre sus valores de error y sesgo, haciéndose difícil la elección de uno de ellos.

Posteriormente se realizó el análisis de los estadígrafos de bondad de predicción en las distintas clases de diámetro-altura. Los cuadros 1, 2 y 3 del anexo 3 detallan los valores de diferencia agregada, raíz del error medio cuadrático y error medio absoluto para cada clase de diámetro-altura y modelo de ahusamiento estudiado. En éstos se apreció que existe un modelo, que en casi todas las clases de diámetro-altura, presenta los valores mayores de estos estadígrafos, en relación con el resto de las funciones, éste corresponde al modelo de Max y Burkhardt, por lo que se descartó para análisis posteriores dada su poca competitividad. La función de Goulding y Murray se mostró con un buen comportamiento en cuanto a sus valores de sesgo y un mal comportamiento en relación a los valores de error, esto último puede deberse a que es una función compatible; las que, según Biging (1984), al imponerles esta restricción afectan directamente la precisión de sus estimaciones de diámetros. Esto en parte debido a que los modelos de ahusamiento compatibles están generalmente formulados como funciones simples de altura relativa, por lo que no pueden ajustarse bien al perfil del fuste. Los modelos de Newnham y Torrubiano se presentaron con valores de error y sesgo similares entre ellos y menores que los del modelo de Max y Burkhardt. La función de Ormerod por su parte tiene un comportamiento relativamente bueno, sus parámetros están relacionados directamente con la forma del fuste, es decir, con el ahusamiento (Newberry y Burkhardt, 1986), pero dada a su poca flexibilidad no entrega mejores resultados. Esto último concuerda con lo concluido por Cao et al. (1980), que asegura que ecuaciones de ahusamiento compatibles no parecen ser una buena elección si el propósito es describir el ahusamiento de los árboles. Un análisis

detallado de las cifras presentadas, mostraron entonces, a los modelos de Bruce, Kozak y Pérez como los más competitivos, con valores de error en las estimaciones de diámetros en el total del fuste del orden del 9% y de sesgo no mayores a 2,1% (ver cuadro 8).

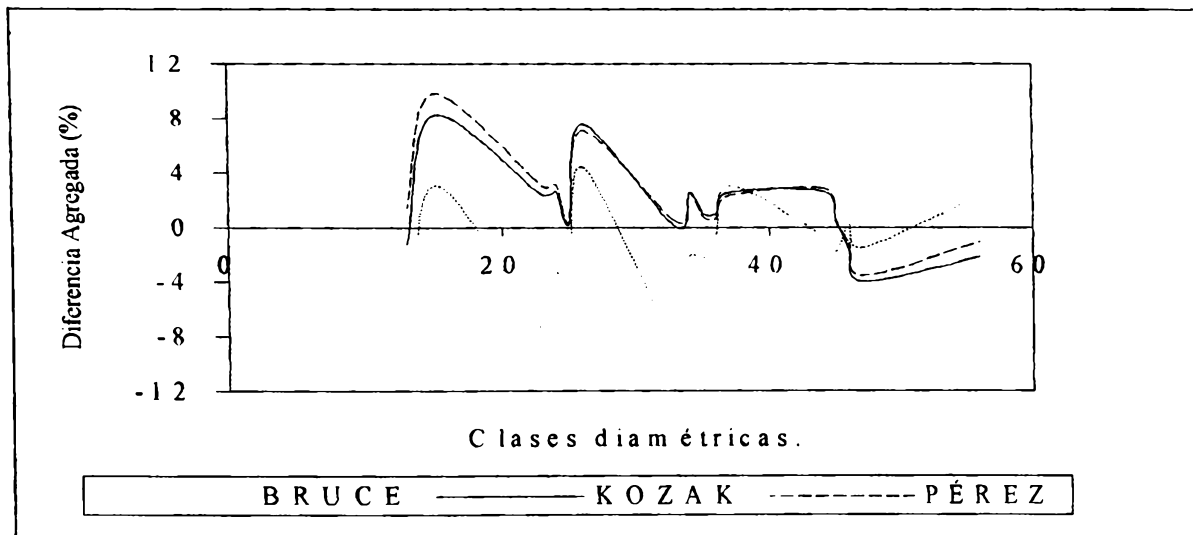


Figura 2. Diferencia agregada por clases diamétricas para la estimaciones de diámetros de los modelos de Bruce, Kozak y Pérez.

En las figura 2 y 3, gráficos que presentan la diferencia agregada y raíz del error medio cuadrático por clase diámetro-altura respectivamente, se puede apreciar que los modelos antes mencionados como los más competitivos, no muestran buenos comportamientos en árboles de clases diamétricas menores (al igual que todos los modelos evaluados), mejorando este comportamiento hacia clases diamétricas mayores. Esto último dice relación con la capacidad de los modelos de ser extrapolados, lo que en este caso no sería de importancia, ya que rara vez estos modelos serán usados en árboles de clases diamétricas menores que 10cm. En la

figura 2 se observa que en clases diamétricas mayores a 10cm la diferencia agregada presenta valores más cercanos a cero, disminuyendo las fluctuaciones de los valores de las clases diamétricas inferiores; por otro lado, la raíz del error medio cuadrático presenta también una tendencia, aunque no tan clara, a disminuir sus valores hacia árboles de clase diamétricas mayores. En relación con el desempeño de las tres funciones, se observa que el modelo de Bruce escapa a la tendencia antes mencionada presentando valores de error y sesgo muy fluctuantes a través de las distintas clases diamétricas.

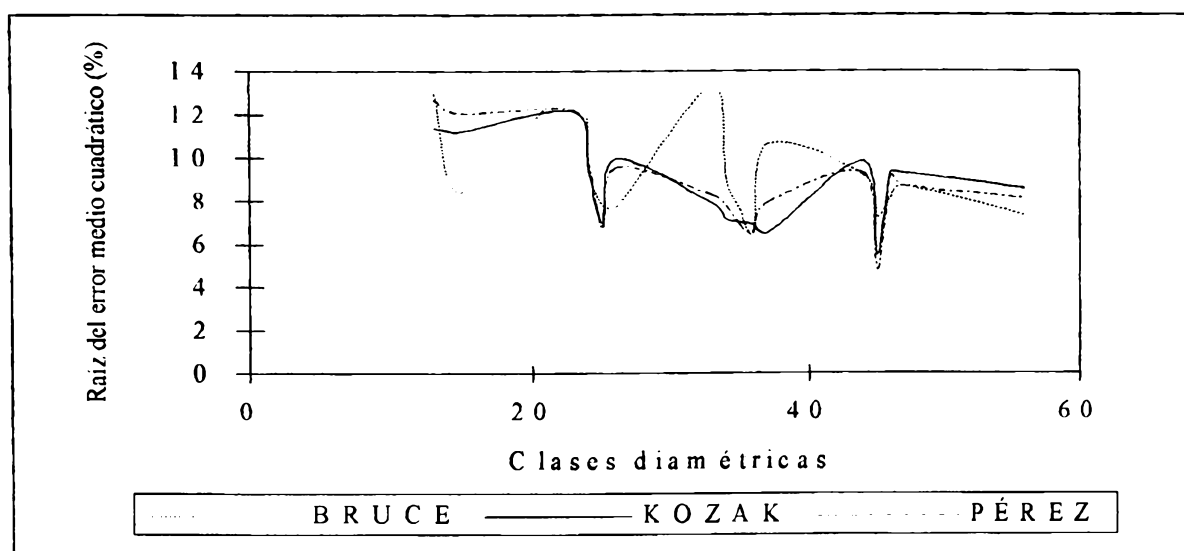


Figura 3. Raíz del error medio cuadrático por clases diámetricas para las estimaciones de diámetros de los modelos de Bruce, Kozak y Pérez.

La elección del modelo con el mejor comportamiento se realizó mediante un sistema de ponderaciones, asignándose valores a los estadígrafos de bondad de predicción para cada uno de los modelos dentro de cada clase de diámetro-altura. El menor valor (un punto) se le dio aquel modelo que presentara el mejor

estadígrafo dentro de cada clase diamétrica. En el cuadro 4 del anexo 3 se encuentra la suma de los puntajes de cada estadígrafo por modelo. Al realizar la ponderación de los estadígrafos por clase de diámetro-altura y por modelo, se observó que diferentes funciones se disputan el primer lugar dependiendo de la clase diamétrica que se trate. Así se concluyó que los modelos de Kozak y Pérez se presentan como las mejores alternativas, mostrando ambos modelos los menores valores en la suma de las ponderaciones, con diferencias mínimas entre ambos, lo que dificulta la elección de uno de ellos.

Luego de realizada la validación de diámetros por clases de diámetro-altura, se procedió a realizar esta validación para porciones del fuste de igual dimensión, esto de modo de poder visualizar el comportamiento de los modelos en las diferentes partes del fuste y así poder entregar un análisis más detallado en cuanto a la bondad de predicción de la estimación de diámetros dentro del árbol.

En esta etapa del estudio se realizó una preselección de las funciones, descartando aquellas que presentaban hasta ahora los valores más altos en la suma de las ponderaciones de sus estadígrafos. Así la validación de diámetros por secciones se realizó sólo para los modelos de Kozak, Pérez, Bruce, Newnham y Torrubiano, presentándose en los cuadros 5, 6 y 7 del anexo 3 los valores de diferencia agregada, raíz del error medio cuadrático y error medio absoluto para cada porción del fuste y función evaluada. En éstos se observó claramente que en los cinco modelos validados existe una tendencia a aumentar los valores de error y sesgo desde la base a la punta del árbol, tendencia que se muestra más o menos marcada dependiendo del modelo que se trate (ver figura 4 y 5). Es importante aclarar con respecto a este aumento, que a pesar de que se desearía que los valores se mantuvieran constantes a lo largo de todo el árbol, en la práctica este aumento no tiene mayor consecuencia, ya que las estimaciones de volúmenes comerciales se

realizan con los dos tercios basales del fuste, no teniendo el último tercio importancia comercial. Real (1986; citado por Torrubiano, 1994) agrega que los altos valores en términos porcentuales en las secciones superiores, son consecuencia que los modelos mantienen un cierto error mas o menos constante a lo largo del fuste en cuanto a unidades de medición (cm) mientras que las medidas decrecen.

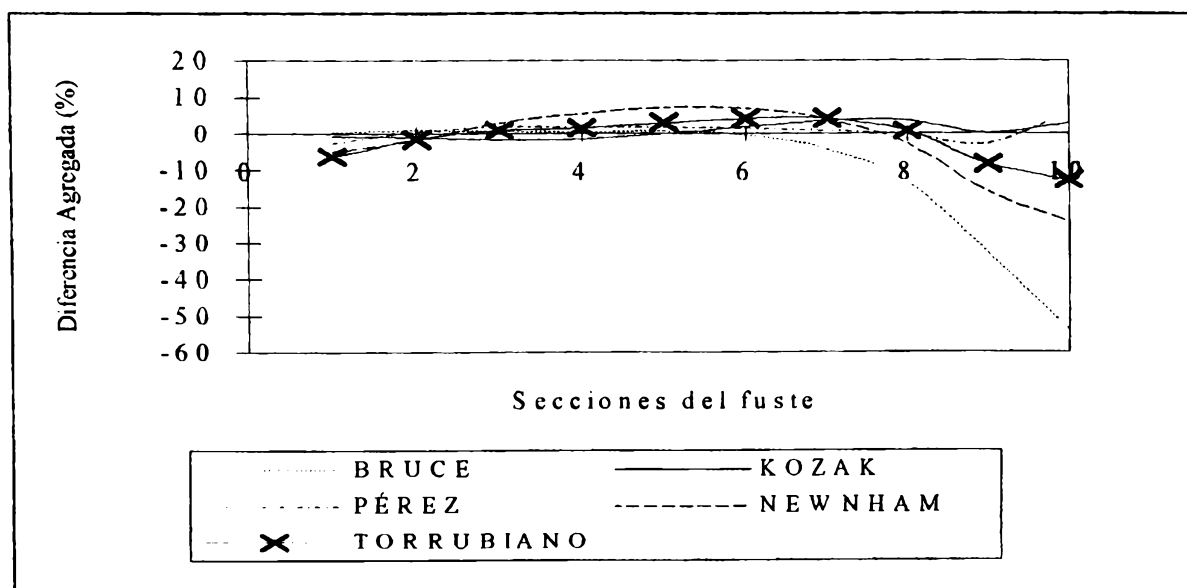


Figura 4. Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de diámetros de los modelos evaluados en la validación de diámetros.

Del análisis de los resultados de esta validación (ver cuadros 5, 6 y 7 del anexo 3) y de las figuras 4 y 5, que presentan gráficamente la evolución de la diferencia agregada y raíz del error medio cuadrático a través de las distintas porciones del fuste de los modelos aquí evaluados, se puede inferir que las funciones de ahusamiento de Newnham y Torrubiano, aunque presentaron valores de los estadígrafos de bondad de predicción normales, son mayores en casi todas

las secciones que los modelos de Kozak, Pérez y Bruce. Por su parte, Bruce presenta valores similares a los de Kozak y Pérez en las secciones inferiores e intermedias, mostrando en las dos últimas secciones superiores un alza notoria de los valores de sus estadígrafos con respecto a los otros dos modelos. Así los modelos de Kozak y Pérez se muestran como las mejores alternativas, con valores de sesgo en las primeras cinco secciones que no sobrepasa el 2%; y en las cinco secciones restantes se observa un aumento en los valores presentando sesgo del orden de 0,00% al 6%. En relación a los valores de error, éstos se mostraron mas o menos similares en las siete primeras secciones con valores entre 6% y 10%, mostrando un alza en las dos últimas secciones donde se encontraron errores de hasta 30%.

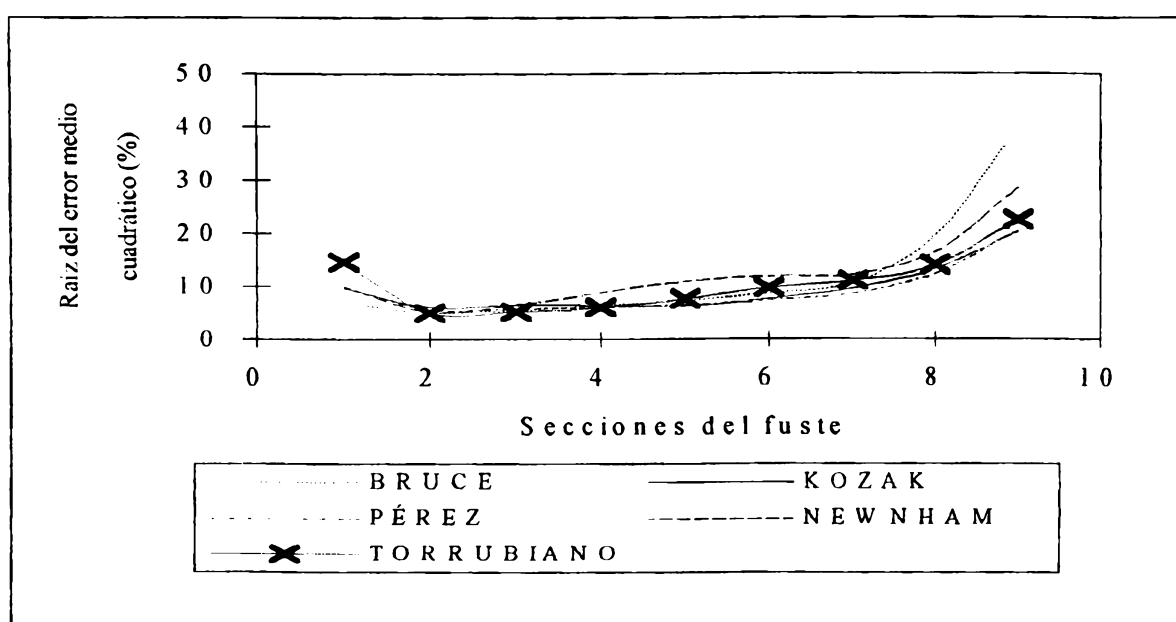


Figura 5. Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de diámetros de los modelos evaluados en la validación de diámetros.

Finalmente se realizó la ponderación de los estadígrafos de bondad de predicción por secciones, tarea que se encuentra resumida en el cuadro 8 del anexo 3, y de la cual se concluyó que los modelos de Newnham y Torrubiano quedan descartados por presentar los mayores valores de estos estadígrafos. Por su parte, los modelos de Kozak y Pérez presentaron los menores valores en la suma de sus ponderaciones, lo que se traduce en menores valores de los estadígrafos en las diferentes porciones del fuste, disputándose éstos los primeros lugares a lo largo de todo el árbol. El cuadro siguiente muestra los valores de error, sesgo y lugares en el ranking de los modelos recomendados una vez finalizada la validación de diámetros.

CUADRO 9. Sesgo, error y posición en los ranking de los modelos recomendados en la validación de diámetros.

	MODELOS RECOMENDADOS	
	Kozak	Pérez
Diferencia agregada (%)	-0,08425	0,19396
Raíz del error medio cuadrático (%)	9,14204	9,01470
Error medio absoluto (%)	6,14667	6,18988
Ranking validación total del fuste	1	2
Ranking validación por clases diamétricas	2	1
Ranking validación por secciones	2	1

En el cuadro anterior se aprecia que el modelo de Kozak tendería a sobrestimar los diámetros estimados, presentando un valor negativo de la diferencia agregada (-0,08424), por su parte el modelo de Pérez subestimaría con un valor de sesgo de 0,1939. En relación a los valores de error, ambos modelos se presentan con valores menores que el 10%, lo que es recomendable. La elección de estos dos

modelos de ahusamiento de forma variable, como recomendados para ser usados en la estimación de diámetros, ratifica los resultados obtenidos por Kozak (1988), que demostraban que la forma del fuste puede ser descrita con errores muy pequeños usando modelos de ahusamiento de forma variable.

4.4.2 Validación de alturas.

Como es sabido las funciones de ahusamiento además de estimar los diámetros a alturas dadas, pueden ser usadas de manera de estimar la altura para un diámetro dado, obteniéndose así, las dimensiones de cualquier troza dependiendo del diámetro que se requiera. Es decir, es posible simular diferentes sistemas de trozado. Esta característica es de importancia, de ahí la necesidad de realizar la evaluación de la bondad de predicción en cuanto a las estimaciones de alturas, labor que en una primera instancia se realizó para el total del fuste (ver cuadro 10) y por clases de diámetro-altura, lo que se puede apreciar en los cuadros 9, 10 y 11 del anexo 3.

CUADRO 10. Resultados evaluación de la bondad de predicción para las estimaciones de alturas en el total del fuste.

MODELOS DEL ESTUDIO	CRITERIOS DE BONDAD DE PREDICCIÓN		
	DIFA(%)	REMC(%)	EMA(%)
BRUCE	-1,45474	11,53954	8,58756
ORMEROD	-0,63633	13,25336	10,22588
GOULDING y MURRAY	-0,82873	15,17771	11,63043
KOZAK	-0,08542	10,58491	6,14667
PEREZ	1,27675	10,20593	7,31577
NEWNHAM	2,16484	10,80182	9,49855
TORRUBIANO	0,74136	10,32200	7,72906

Al observar el cuadro 10 y analizar los valores de la validación de alturas por clases diamétricas (ver cuadros 9, 10 y 11 del anexo 3) se desprende que existen dos modelos que muestran claras diferencias en relación con los restantes, éstos corresponden a las funciones de Murray y Ormerod, las que en la validación del total del fuste presentaron por una parte, buenos comportamientos en relación con sus valores de sesgo, y por otra, los valores mayores de error. En relación a la validación por clases diamétricas se mostraron como los modelos menos competitivos con valores de error por clase de diámetro-altura que sobrepasan el 20% y valores de sesgo hasta del 10 %. Por su parte, los modelos de Newnham y Bruce se encontraron en una etapa intermedia, con valores de error y sesgo bastante similares entre ellos. Así los modelos que se presentaron como las mejores alternativas fueron los de Kozak, Pérez y Torrubiano, mostrando tanto para el total del fuste, como por clases de diámetro-altura los menores valores de error y sesgo, encontrándose los mayores valores de estos estadígrafos en las clases diamétricas inferiores (al igual que en las estimaciones de diámetros), lo que permite concluir que estos modelos no constituyen buena herramienta para estimar alturas en árboles de clases diamétricas inferior a 10 cm (ver figura 6 y 7).

En base a los resultado de las ponderaciones de los estadígrafos por clases diamétricas (ver cuadro 12 del anexo 3) y a lo observado en las figuras 6 y 7, que muestran la diferencia agregada y raíz del error medio cuadrático de las estimaciones de altura por clases diamétricas, se puede apreciar que efectivamente los modelos de Kozak y Pérez son los que se presentan como mejores alternativas para las estimaciones del alturas en las diferentes clases diamétricas, presentando los menores valores de error y de sesgo, y por ende, la menor suma total de sus ponderaciones.

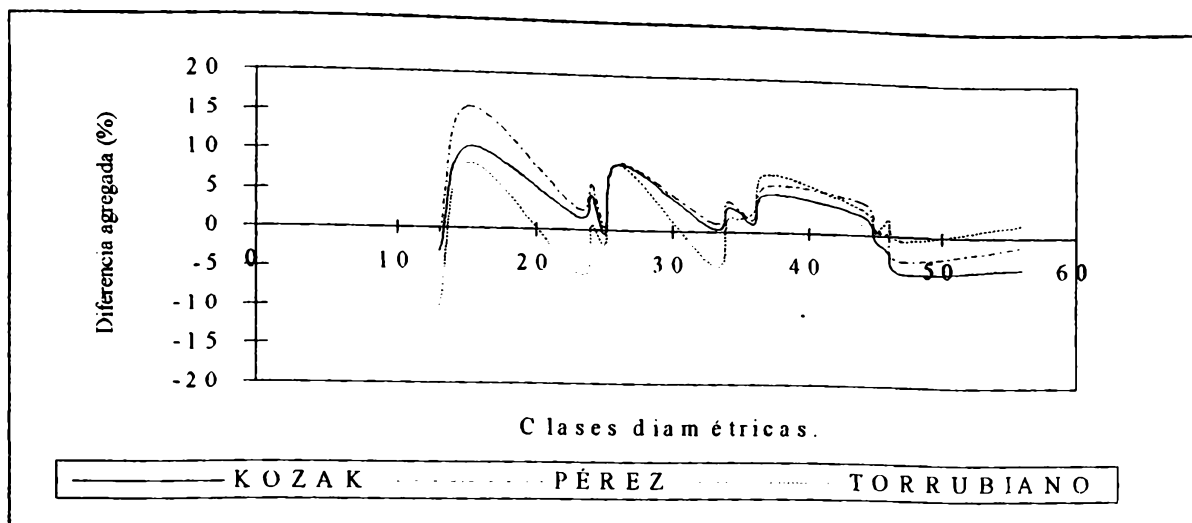


Figura 6. Diferencia agregada por clases diamétricas para las estimaciones de alturas de los modelos de Kozak, Pérez y Torrubiano.

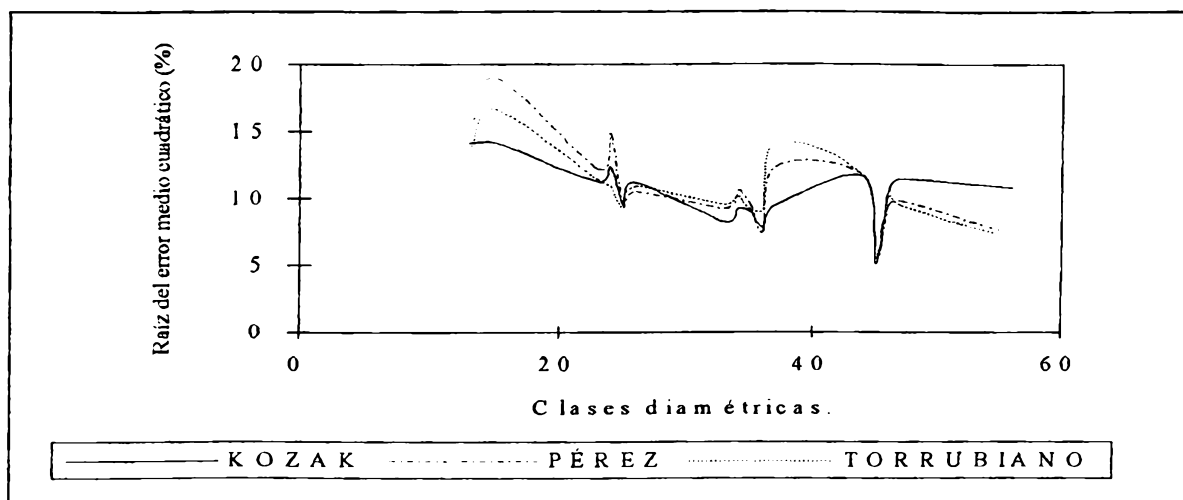


Figura 7. Raíz del error medio cuadrático por clases diamétricas para las estimaciones de alturas de los modelos de Kozak, Pérez y Torrubiano.

Posteriormente se procedió a realizar la validación de las estimaciones de alturas para porciones del fuste de igual dimensión, labor que se encuentra resumida en los cuadros 13, 14 y 15 del anexo 3, los que presentan los valores de diferencia agregada, raíz del error medio cuadrático y error medio absoluto para las diferentes porciones del fuste y modelos evaluados. En esta etapa del estudio, al igual que para las estimaciones de diámetros, se trabajo con aquellas funciones que presentaron los mejores comportamientos en la validación de alturas por clases diamétricas, es así como se observan los valores de error y sesgo para los modelos de Kozak, Pérez, Bruce, Newnham y Torrubiano.

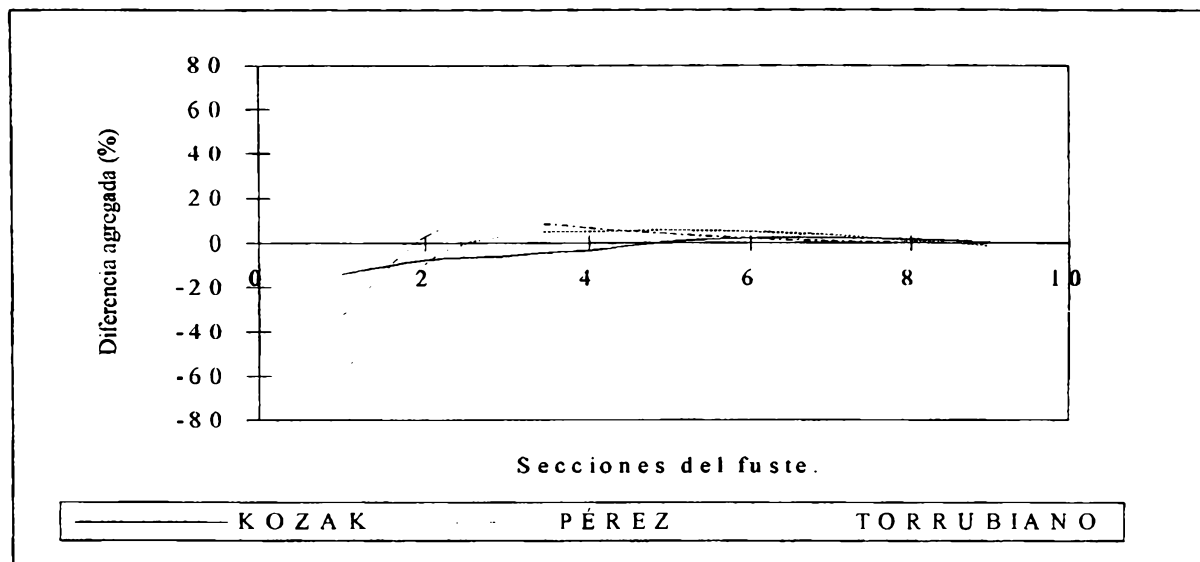


Figura 8. Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de alturas de los modelos evaluados en la validación de alturas.

Al analizar con detención los resultados de las validación por secciones (ver cuadros 13, 14 y 15 del anexo 3) se observó que existen dos modelos que a través de todas las porciones del fuste se presentan con los valores menores de los

estadígrafos de bondad de predicción, aunque al igual que el resto de los modelos muestran en las secciones inferiores un alza notoria de sus valores de error y sesgo, lo que queda en evidencia al apreciar la figuras 8 y 9 que presenta gráficamente los valores de error y sesgo para los modelos con mejores características; en este gráfico se observa la clara tendencia de los modelos a empeorar sus valores en las secciones inferiores del fuste y mejorarlos a medida que se avanza hacia la punta del árbol. Esta tendencia, que coincide con los resultados de Torrubiano (1994), hace que estos modelos no sean una buena herramienta para estimar alturas en la mitad inferior del fuste, la que es de mayor volumen y por lo tanto mayor valor comercial. Esto último traería serios problemas cuando se realizan labores de inventarios sin un trozado definido de antemano, es decir, es necesario definir los productos a obtener de modo de estimar diámetros a alturas dadas y no alturas para diámetros dados.

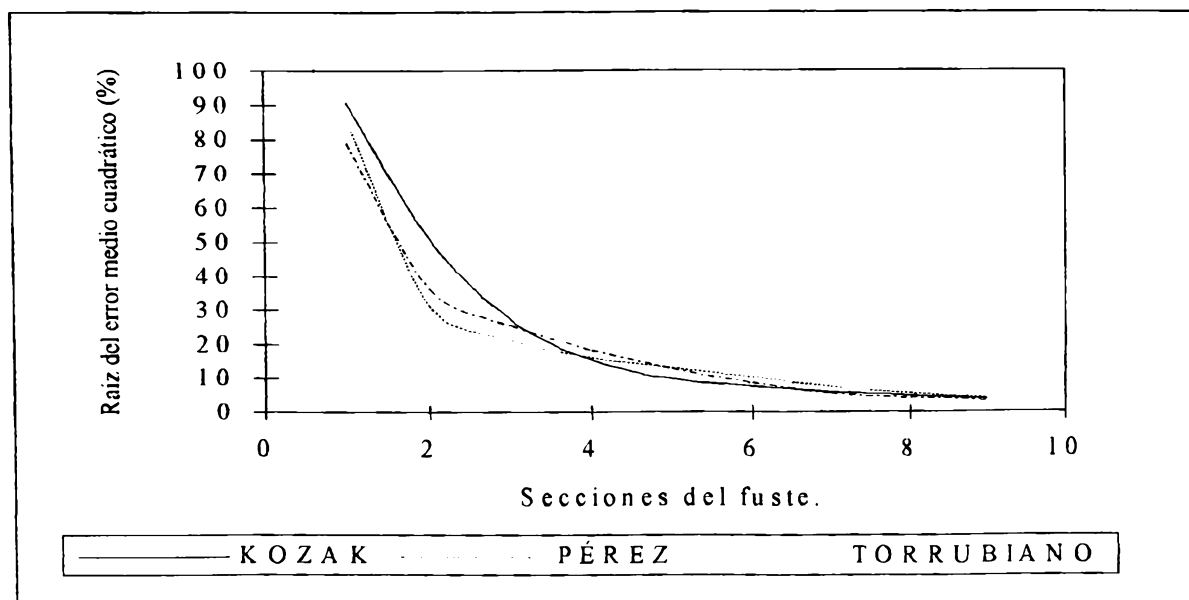


Figura 9. Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de alturas de los modelos evaluados en la validación de alturas.

Luego de realizado el análisis de estos estadígrafos se procedió a su ponderación por sección y por modelo validado (cuadro 16 del anexo 3), de modo de recomendar el uso de algunos de ellos. Los modelos que se presentaron con los mejores comportamientos en relación a las estimaciones de alturas son los de Kozak y Pérez, con los menores valores de la suma total de las ponderaciones de sus estadígrafos. El cuadro 11 muestra los valores de error, sesgo y lugares en el ranking de los modelos recomendados una vez finalizada la validación de alturas. En éste se aprecia que el modelo de Kozak con un valor de diferencia agregada de -0,08542 tendería a sobrestimar, así como también el modelo Pérez subestimaría con un valor de diferencia agregada de 1,2767.

CUADRO 11. Sesgo, error y posicion en los ranking de los modelos recomendados en la validación de alturas.

	MODELOS RECOMENDADOS	
	Kozak	Pérez
Diferencia agregada (%)	-0,08542	1,27675
Raíz del error medio cuadrático (%)	10,58491	10,20593
Error medio absoluto (%)	6,14667	7,31577
Ranking validacion total del fuste	1	2
Ranking validacion por clases diamétricas	1	3
Ranking validacion por secciones	2	1

4.4.3 Validación de volumen.

En esta etapa del estudio se realizó el análisis comparativo de los estadígrafos de bondad de predicción de los modelos para las estimaciones de volumen, de manera de obtener una visión más amplia acerca del comportamiento de éstos en relación a estimar volumen a diferentes diámetros límites o índices de utilización. Es importante aclarar que la precisión de las estimaciones de volumen a partir de los modelos de ahusamiento dependen directamente de cuan bien se ajusten los modelos al perfil del fuste, es decir, aquel modelo que mejor describa el fuste, será el que entregue las estimaciones más precisas del volumen (Byrne y Reed, 1986), más aún si el volumen fue obtenido por la fórmula de Smalian y no por integración. De esto último se desprende que la validación de las estimaciones de volumen está en directa relación con la validación de las estimaciones de diámetros, mostrándose como las mejores alternativas para estimar volúmenes los mismos modelos que se mostraron con el mejor comportamiento en las estimaciones de diámetros.

Por lo anterior la validación de las estimaciones de volúmenes se realizó sólo para los modelos de Bruce, Kozak, Pérez, Newnham y Torrubiano, los que habían presentado los mejores comportamientos en las estimaciones de diámetros y alturas. Éstos se validaron, tanto para el total del fuste, como para porciones de éste de igual dimensión (ver cuadros 17, 18 y 19 del anexo 3). Al analizar los resultados de esta validación, se observó que al igual que en las estimaciones de diámetros, los modelos de Bruce, Kozak y Pérez eran los que mostraban los mejores comportamientos a través de las diferentes secciones del fuste. Conclusión que se corroboró al realizar la ponderación de los estadígrafos de bondad de predicción para las diferentes secciones (ver cuadro 20 del anexo 3), donde los modelos de

Kozak y Pérez se presentaron con las menores sumas de las ponderaciones de los estadísticos de error y de sesgo.

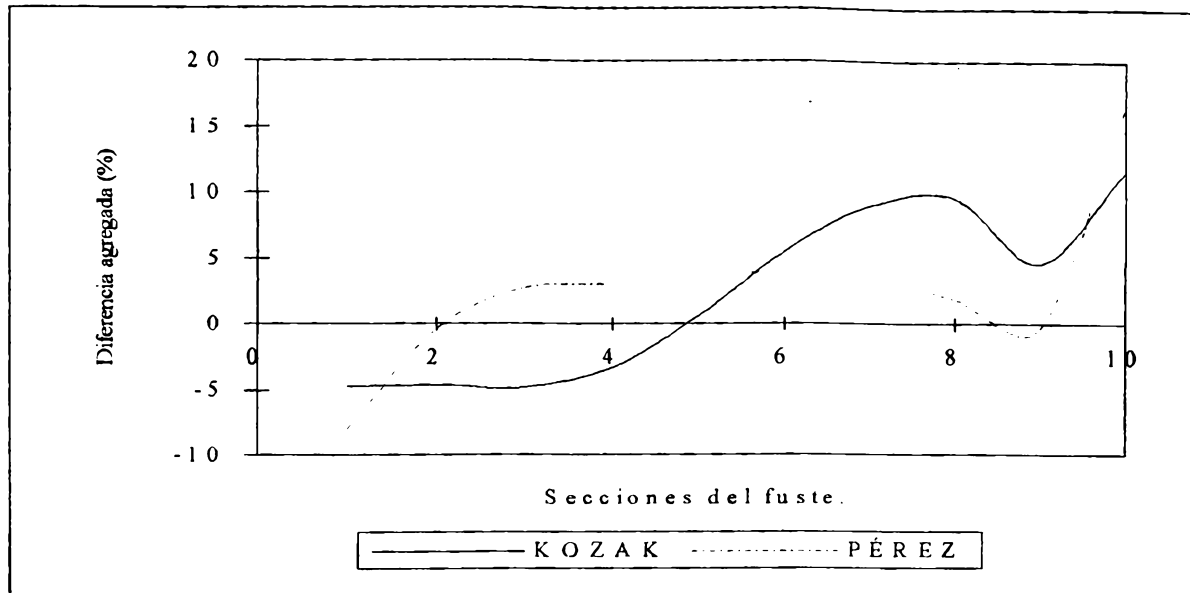


Figura 10. Diferencia agregada por secciones del fuste para las estimaciones de volumen de los modelos de Kozak y Pérez.

En las figuras 10 y 11, que muestran gráficamente la evolución de la diferencia agregada y la raíz del error medio cuadrático por secciones respectivamente, se aprecia la misma tendencia que en las estimaciones de diámetros, a aumentar los valores de error y de sesgo hacia las secciones superiores del fuste, lo que como se dijo no sería de importancia, ya que las estimaciones de volúmenes comerciales se realizan con los dos tercios basales del fuste.

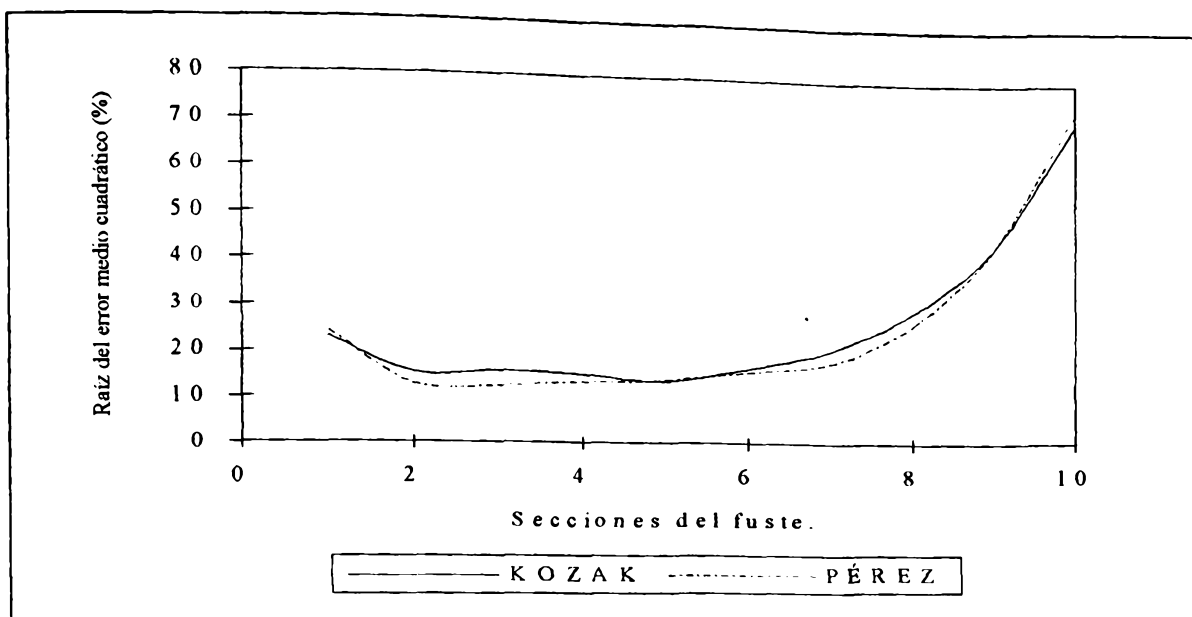


Figura 11. Raíz del error medio cuadrático por secciones del fuste para las estimaciones de volumen de los modelos de Kozak y Pérez.

Así el primer modelo recomendado una vez finalizada la validación de volumen fue el modelo de Pérez con un sesgo de -0,76%, lo que indica que el modelo tendería a sobrestimar y con valores de error del orden del 10% al 20%. El modelo de Kozak también recomendado, se presentó con un sesgo de -2,23%, por lo que este modelo igual sobrestima, pero en mayor cantidad que el anterior. Sus valores de error se mostraron similares a los del modelo de Pérez.

5. CONCLUSIONES.

En base al análisis de los resultados obtenidos en las diferentes validaciones y en los procesos de selección, los modelos de Kozak y de Pérez se muestran como las mejores alternativas de funciones de ahusamiento para pino oregón en la provincia de Valdivia.

Debido que actualmente no existen muchos modelos de ahusamiento para pino oregón en nuestro país, es relevante haber determinado que los modelos de Kozak y Pérez permiten predecir de buena forma el diámetro y el volumen, información que es de gran importancia en el manejo del recurso forestal. Para esto se determinó un sesgo de -0,084 y 0,19 en las estimaciones de diámetro, y -2,23 y -0,76 para las estimaciones de volumen de los modelos de Kozak y Pérez respectivamente.

Ambos modelos presentan comportamientos bastante similares, de ahí que no se definió categóricamente por uno de ellos. Siendo estos modelos los que se presentaron menos sesgados y más precisos.

De los modelos de volumen evaluados, el modelo Vol4 es el que se presenta como la mejor herramienta de trabajo, siendo esta la función de volumen con la que se ajustó el modelo de Goulding y Murray.

Los modelos de Max y Burkhart, Goulding y Murray y Ormerod fueron los que generalmente presentaron los mayores valores de error y sesgo en las diferentes

validaciones, por lo que estos modelos no constituyen una buena opción de modelos fustales para pino oregon en la provincia de Valdivia.

Dado los resultados se puede inferir que los modelos de ahusamiento de forma variable son los que se presentan como las mejores opciones de trabajo, siendo mas o menos simples y modelando en forma continua las variables a lo largo del árbol.

Los resultados de este estudio comprobaron las bondades de trabajar con funciones de ahusamiento para estimar diámetros y volúmenes. No recomendándose el uso de éstas para estimar alturas en la mitad inferior del fuste.

Se sugiere una vez finalizado el estudio que cualquier modelo recomendado debe conllevar una análisis profundo en cuanto al desempeño de los modelos no sólo para el total del fuste, sino que por clases de diámetros y alturas y secciones del fuste de igual dimensión, así como también para estimar diámetros, alturas y volúmenes.

6. RESUMEN.

Este estudio tiene como objetivo principal ajustar y estudiar comparativamente diferentes modelos de ahusamiento para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) (pino oregón) en la provincia de Valdivia, de manera de recomendar el uso de alguno de ellos.

La base de datos utilizada proviene de información recopilada en cuatro predios pertenecientes a la Universidad Austral de Chile, provincia de Valdivia, en el año 1989. Con esta base de datos se ajustaron ocho modelos de ahusamiento elegidos desde la literatura considerando los resultados que hasta ahora éstos habían tenido. Se empleo como técnica de ajuste de regresión lineal el método de mínimos cuadrados, para lo que fue necesario linealizar aquellos modelos que presentaban funciones no lineales y que fueran linealizables.

Para evaluar los diferentes modelos ajustados y elegir el mejor ajuste, se compararon los modelos basándose en su capacidad de predicción, utilizando como medidas de bondad de predicción la diferencia agregada, raíz del error medio cuadrático y error medio absoluto.

Finalizado el análisis de los criterios anteriores, dos modelos fueron recomendados para ser usados en la estimación de diámetros a distintas alturas de pino oregón en la provincia de Valdivia. Éstos fueron los modelos de Kozak y de Pérez, los que presentaron los mejores comportamientos de sus estadígrafos tanto para las estimaciones de diámetros, alturas como volumen.

SUMMARY.

The main objective of this study is to fit and study different taper models for *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) (Douglas fir) in the Valdivian province, in order to recommend the use of one of them.

The data base used comes from information registered in four properties owned by the Austral University of Chile, province of Valdivia, in 1989. With this data base eight taper models were fitted, which previously were selected from the literature considering the results that these models had had to far. Least square method was used as the fitted technique in lineal regression, where it was necessary to line up those models which did not have lineal functions and could be made lineal.

To be able to evaluate the different fitting models and to choose the best one, the models were compared judging their capacity of prediction, using as bondage measurements the prediction of aggregated difference, mean error square root and the absolute mean error.

When the analysis of the previous criterias was finished, two models were recommended to be used in the estimation of diameters at different heights for Douglas fir in the Valdivian province. These were the Kozak and the Pérez models, which showed the best statistical behaviour for diameter, height and volumen estimations.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Aguirre, J. J.; Wrann, J. 1989. Selección de procedencias de pino oregón en la zona sur de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal* 3 (6): 73-84.

Binging, G. S. 1984. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. *For. Sci.* 30: 1103-1117.

Bruce, D.; Curtis, R.; Vancovering, C. 1968. Development of a system of taper and volume tables for red alder. *For. Sci.* 14 (3): 339-350.

Byrne, J.; Reed, D. 1986. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine. *For. Sci.* 32 (2): 423-443.

Burkhart, H.; Walton, S. B. 1985. Incorporating crown ratio into taper equation for loblolly pine trees. *For. Sci.* 31 (2): 478-484.

Cao, Q. V.; Burkhardt, H.; Max, T. 1980. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction for loblolly pine to any merchantable limit. *For. Sci.* 26 (1): 71-80.

Coffré, L. M. 1983. Modelos Fustales. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ingeniería Forestal. 46 pp.

Demaerschalk, J. P. 1971. Taper equations can be converted to volume equations and point sampling factors. *For. Chron.* 47 (6): 352-354.

Demaerschalk, J. P. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *For. Sci.* 18 (3): 241-245.

Demaerschalk, J. P.; Kozak A. 1977. The whole-bole system: a conditioned dual-equation system for precise prediction of the tree profiles. *Can. J. For. Res.* 7: 488-497.

Díaz-Vaz, J. E.; Ojeda, F. 1980. Densidad intraincremental de *Pseudotsuga menziessi*. I : Variaciones en un análisis fustal. *Revista Bosque* 3 (2): 86-95.

Goulding, C. J.; Murray, J. C. 1976. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. *N. Z. J. For. Sci.* 5 (3): 312-322.

Goulding, C. J. 1979. Cubic spline curves and calculation of volume of sectionally measured trees. *N. Z. J. For. Sci.* 9 (1): 89-99.

Grosse, W. H.; Kannegiesser, U. 1988. Investigación para el manejo de las plantaciones de pino oregón. INFOR-CORFO. Concepción, Chile.

Hann, D.; Walters, D.; Scrivani, J. 1987. Incorporating crown ratio into prediction equations for Douglas-fir stem volume. *Can. J. For. Res.* 17: 17-22.

INFOR-CORFO. 1986. Especies forestales exóticas de interés económico para Chile. INFOR-CORFO. Santiago, Chile. 139-145 pp..

INFOR-CORFO. 1996. Estadísticas forestales 1995. Santiago, Chile.

Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Can. J. For. Res. 18: 1363-1368.

Lardiez, M. A. 1991. Programa "Curvas". Manual del Usuario. Manual de Trabajo S/N. Proyecto Nacional de simulación de Pino radiata. Fundación Chile. Valdivia.

Larson, P. R. 1963. Stem form development of forest trees. For. Sci. Monogr. 5. 42 pp..

Lowell, K. E. 1986. A flexible polynomial taper equation and its suitability for estimating stem profiles and volumes of fertilized and unfertilized radiata pine trees. Aust. For. Res. 16: 165-174.

Max, T. A.; Burkhardt, H. E. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci. 22 (3): 283-289.

M'Hirit, O.; Postaire, J. G. 1985. A nonparametric technique for taper function estimation. Can. J. For. Res. 15: 862-871.

- Muhairwe, C.; LeMay, V.; Kozak, A. 1994.** Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.* 24: 252-259.
- Newberry, J. D.; Burkhardt, H. 1986.** Variable-form stem profile models for loblolly pine. *Can. J. For. Res.* 16: 109-114.
- Newnham, R. M. 1992.** Variable-form taper functions for four Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 22: 210-223
- Ormerod, D. W. 1973.** A simple bole model. *For. Chron.* 49: 136-138.
- Ormerod, D. W. 1986.** The diameter-point method for tree taper description. *Can. J. For. Res.* 16: 484-490.
- Pérez, D. N.; Burkhardt, H. E.; Stiff, C. T. 1990.** A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede in Central Honduras. *For. Sci.* 36 (1):186-191.
- Reed, D.; Green, E. 1984.** Compatible stem taper and volume ratio equations. *For. Sci.* 30 (4): 977-990.
- Torrubiano, C. 1994.** Funciones de ahusamiento para *Pinus radiata* D. Don. Tesis Mag. en Ciencias. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ingeniería Forestal. 96 pp..

ANEXO 1

Resumen salidas del programa para el ajuste de las
funciones de volumen.

CUADRO 1. Resumen del ajuste de los modelos de volumen.

MODELOS DEL ESTUDIO	Multiple R	Squared Multiple R	Adj. Squared Multiple R	St. Error of Estimate
VOL1	0,99200	0,98400	0,98400	0,05108
VOL2	0,99200	0,98400	0,98400	0,05111
VOL3	0,99200	0,0,985	0,98500	0,05040
VOL4	0,99200	0,98500	0,98500	0,05040
VOL5	0,99600	0,99300	0,99300	0,08260

ANEXO 2

**Resumen salidas del programa para el ajuste de las
funciones de ahusamiento.**

CUADRO 1. Resumen del ajuste de los modelos de ahusamiento.

MODELOS DEL ESTUDIO	Multiple R	Squared Multiple R	Adj. Squared Multiple R	St. Error of Estimate
BRUCE	0,99000	0,98000	0,98000	0,08550
ORMEROD	0,97100	0,94300	0,94300	0,17522
GOULDING y MURRAY	0,77900	0,60700	0,60600	1,16607
MAX Y BURKHART	0,96400	0,92900	0,92900	0,16094
KOZAK	0,98500	0,97000	0,97000	0,14068
PEREZ	0,98400	0,96800	0,96800	0,14449
NEWNHAM	0,78200	0,61100	0,61000	0,29220
TORRUBIANO	0,82400	0,67900	0,67900	0,26538

ANEXO 3

Valores de los estadígrafos de bondad de predicción por clases
diamétricas y por secciones del fuste.

CUADRO 1. Resultados evaluación bondad de predicción. DIFERENCIA AGREGADA para las estimaciones de diámetros en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	-10,22852	-4,44241	-0,21938	-4,81414	-1,23400	1,38635	-11,04509	-12,95247
1	5	3,12921	10,28264	-4,81830	5,47779	8,23688	9,82503	5,23553	6,19785
2	3	-7,52579	-3,87800	-0,67449	-3,98397	2,36803	3,05176	-7,75901	-10,84236
2	4	-3,31442	1,68966	-2,95167	-1,50066	2,63430	3,17577	-1,88114	-1,29215
2	5	-4,36034	1,76659	-5,07118	-3,42813	0,25241	0,26778	-1,48282	-1,18462
2	6	4,43586	10,28966	3,56138	4,19862	7,58069	7,13655	10,28966	7,42621
3	3	-8,45950	-6,11776	-4,23708	-7,23816	0,00553	0,40490	-7,56147	-9,03394
3	4	-2,10158	-0,03390	-1,00740	-3,73787	2,56376	2,49316	0,39002	0,47897
3	5	-2,23207	2,20204	-1,49988	-2,98263	1,03996	0,77687	0,72226	0,56912
3	6	-0,47283	3,53039	0,04218	-2,61241	1,04419	0,65926	2,84601	1,84078
3	7	3,10692	6,22684	2,86805	-0,40299	2,57881	2,31069	6,27234	4,65551
4	4	-0,67301	-0,29399	0,08070	-4,01066	2,63727	2,88658	2,44560	2,10117
4	5	-1,79965	-1,34388	-2,61980	-5,86643	0,55185	0,43468	0,92794	0,35384
4	6	0,15386	1,29078	-0,47813	-5,14792	-1,62849	-1,17161	3,05761	1,39767
4	7	-1,49347	-0,10594	-2,35602	-7,34839	-3,99650	-3,55165	1,39292	-0,50029
5	6	2,29831	0,90880	-0,82023	-5,99448	-2,17252	-1,08915	4,27829	2,39458

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 2. Resultados evaluación bondad de predicción. RAZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO CUADRATICO para las estimaciones de diámetros en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	12,95052	13,96319	13,49930	15,52305	11,33360	12,65871	13,58679	20,44838
1	5	8,44342	19,40149	18,29380	15,54464	11,23449	12,05226	13,47862	12,87298
2	3	13,39630	18,35063	16,51608	21,05967	12,14535	12,21966	13,53240	25,05087
2	4	9,51950	12,55670	12,64785	15,13462	9,37545	9,78689	10,26331	10,16405
2	5	7,77273	12,67145	13,27590	13,85534	7,00841	6,78515	8,78902	8,44287
2	6	7,72130	16,45922	13,63866	14,11028	9,96725	9,54845	16,45922	11,58024
3	3	13,30567	15,73655	14,91218	20,03156	7,86559	8,25866	15,26936	20,63644
3	4	9,05732	12,17298	11,72572	16,03383	7,16054	7,75174	10,06036	8,52630
3	5	7,58483	11,18827	11,88762	14,04775	6,99609	6,88944	8,15048	7,60343
3	6	6,54735	12,18726	12,30403	14,23137	6,89406	6,49602	9,06435	8,25769
3	7	10,64135	13,73428	14,44806	17,44392	6,49468	7,91547	12,51742	10,87433
4	4	9,19165	14,16150	11,32489	16,03995	9,85234	9,26715	9,97967	8,89388
4	5	7,28219	10,84660	10,50565	14,93852	5,48210	4,79551	7,64794	6,25873
4	6	8,13484	12,01393	12,01361	15,42789	9,26627	9,11336	10,17398	8,92543
4	7	8,68800	10,74991	12,20067	15,55414	9,27427	8,69269	8,73754	7,80936
5	6	7,32255	13,18570	12,18875	16,25051	8,57066	8,10816	10,40258	10,00931

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 3. Resultados evaluación bondad de predicción. ERROR MEDIO ABSOLUTO para las estimaciones de diámetros en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	10,74040	10,45094	10,58501	11,48690	8,60146	10,21024	11,12431	13,14747
1	5	6,27860	17,11978	15,06057	13,94347	8,60027	9,82503	11,68237	10,97577
2	3	10,25901	12,40220	11,66968	14,10863	7,90839	8,31442	10,68352	13,29357
2	4	7,17811	8,91919	9,81455	11,58753	6,95330	7,49335	7,72490	7,51037
2	5	6,30315	9,71780	10,49009	10,87263	5,35213	5,01129	6,66468	6,34140
2	6	5,01517	11,81241	10,97655	10,70897	7,63586	7,15310	11,81241	8,06069
3	3	10,83137	12,20068	12,07180	14,70891	5,84506	6,30915	11,54742	11,26642
3	4	6,93176	8,19887	8,98824	12,29846	5,11601	5,82110	7,99764	6,51779
3	5	5,85381	8,29238	9,38918	11,25217	5,21023	5,25242	6,57880	5,92132
3	6	4,82830	9,56371	9,81727	11,73002	4,76503	4,65250	7,44200	6,29027
3	7	9,47351	11,19922	12,97530	14,99838	5,59149	7,14982	11,30647	9,70588
4	4	7,21862	11,25811	8,83989	12,39228	7,50540	7,61925	8,66840	7,59764
4	5	5,57469	7,02636	8,20621	11,35911	3,71998	3,81605	6,62917	4,68190
4	6	6,17402	8,78803	9,56077	12,44440	6,48366	6,34874	7,83262	6,49251
4	7	7,03730	8,39027	9,61058	12,98020	6,57360	6,33882	7,18185	6,18553
5	6	5,59335	8,36018	9,22149	12,56145	6,57532	5,55869	7,88910	6,22617

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 4. Resultados de la suma de los puntajes de cada estadígrafo de predicción en las distintas clases de diámetro-altura para las estimaciones de diámetros.

MODELOS DEL ESTUDIO.	SUMA DE PUNTAJES			
	DIFA	REMC	EMA	TOTAL
BRUCE	77	39	43	159
ORMEROD	72	106	98	276
GOULDIN Y MURRAY	52	97	103	252
MAX Y BURKHART	116	119	116	351
KOZAK	67	36	29	132
PEREZ	63	33	33	129
NEWNHAM	83	80	84	247
TORRUBIANO	71	66	64	201

CUADRO 5. Resultados evaluación bondad de predicción. DIFERENCIA AGREGADA para las estimaciones de diámetros por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	-2,00119	-0,08425	0,19396	0,40616	-0,82137
1	0,30197	-0,83529	-2,66431	-4,64810	-6,30348
2	1,09156	-1,07300	0,38199	-1,91098	-1,59781
3	0,79711	-1,67362	1,97624	3,05425	0,92829
4	0,45536	-1,55257	1,87248	5,38849	1,58717
5	0,73932	-0,01035	1,83234	7,06912	3,11870
6	-0,48685	1,91533	1,48787	6,72087	4,20720
7	-4,20428	3,63572	0,93026	4,02513	4,08833
8	-13,37601	3,71923	-0,40404	-2,81619	0,71383
9	-32,75134	0,17901	-2,78601	-16,02332	-8,49669
10	-53,94669	3,06965	6,05116	-24,24764	-12,60533

CUADRO 6. Resultados evaluación bondad de predicción. RAZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO para las estimaciones de diámetros por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	9,21378	9,14204	9,01470	10,80182	11,65447
1	6,99573	9,64393	9,88657	10,02545	14,53956
2	4,96244	6,21397	5,79340	5,25051	5,01728
3	5,51361	6,46142	5,89607	6,57918	5,20869
4	6,33632	6,39300	6,05375	8,79819	6,07557
5	7,46599	6,38020	6,56236	10,95933	7,71057
6	8,62667	7,64315	7,40293	12,02670	9,67470
7	10,70869	9,54436	8,57119	12,33710	11,01707
8	19,58574	13,32337	12,43167	16,50869	14,02911
9	40,01626	20,30406	20,43746	28,61116	22,54871
10	64,94842	30,70009	31,79872	41,68468	33,27880

CUADRO 7. Resultados evaluación bondad de predicción. ERROR MEDIO ABSOLUTO para las estimaciones de diámetros por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	6,87297	6,14667	6,18988	8,13576	7,42035
1	4,39318	6,06031	6,84660	7,84689	9,96282
2	3,65850	4,47973	4,33691	4,12034	3,77107
3	4,07704	4,61583	4,57757	4,88148	3,81699
4	4,83699	4,79017	4,67320	6,67345	4,61119
5	5,72532	4,84901	4,82993	8,32837	5,78668
6	6,78949	5,85926	5,62173	9,53577	7,61512
7	8,51698	7,70048	6,87887	10,22072	9,08943
8	15,83440	10,65550	9,98862	13,20885	11,49203
9	34,45824	15,70753	15,65332	23,01607	17,76111
10	55,77816	23,00516	23,46733	34,47120	27,32588

CUADRO 8. Resultados de la suma de los puntajes de cada estadígrafo de predicción en las distintas porciones del fuste para las estimaciones de diámetros.

MODELOS DEL ESTUDIO.	SUMA DE PUNTAJES			
	DIFA	REMC	EMA	TOTAL
BRUCE	28	31	32	91
KOZAK	21	24	25	70
PEREZ	23	20	19	62
NEWNHAM	42	44	44	130
TORRUBIANO	33	31	30	94

CUADRO 9. Resultados evaluación bondad de predicción. DIFERENCIA AGREGADA para las estimaciones de alturas en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	-13,63951	-9,43235	-2,42810	-10,55250	-3,04089	-0,62926	-13,03331	-10,09785
1	5	2,09151	11,14195	-7,49019	9,91194	10,45755	15,69350	7,01158	8,40433
2	3	-10,19282	-9,06858	-3,33198	-8,91243	1,68376	2,70176	-7,55535	-5,64595
2	4	-4,07097	0,35859	-3,23919	-2,14353	4,48666	5,89693	-0,83686	0,45755
2	5	-6,69232	0,10335	-6,14326	-4,33800	-0,36450	0,37127	-1,58657	-1,70469
2	6	5,04517	10,83360	5,29467	6,27167	8,72466	8,75617	10,83360	8,61960
3	3	-9,66881	-10,55838	-7,30217	-12,20441	0,37695	1,17436	-5,32655	-4,46066
3	4	-2,36655	-2,46887	-0,62875	-5,91784	3,12897	3,98131	1,95901	1,69284
3	5	-1,69633	1,43032	-0,31615	-2,92675	2,42208	2,69427	2,59008	1,88583
3	6	0,41206	2,83201	1,62013	-2,21060	1,15804	1,84896	4,58997	2,69600
3	7	9,09788	6,50913	7,89463	1,43934	5,14435	6,18399	9,98012	7,69374
4	4	-0,87380	-2,66363	-0,57171	-6,35050	2,48173	4,34952	5,22982	3,41725
4	5	-2,87053	-4,12148	-3,55546	-8,43798	-0,71109	0,69444	2,04766	0,35198
4	6	2,00877	0,10687	1,22034	-5,58827	-2,11786	-0,03325	5,14000	2,15822
4	7	-0,34455	-1,26366	-1,13039	-7,32510	-4,94790	-3,28164	2,62687	-0,59453
5	6	3,34412	-1,22983	-1,30733	-6,82616	-4,25025	-1,20361	5,88698	1,77692

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 10. Resultados evaluación bondad de predicción. RAZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO CUADRATICO para las estimaciones de alturas en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	18,12229	13,49700	14,96964	16,58778	14,17442	14,85096	15,92221	13,58895
1	5	11,98338	24,10888	25,90343	23,26014	14,16981	18,96986	18,67991	16,64362
2	3	15,16515	14,40390	16,91053	17,96252	11,23808	12,26249	13,45893	11,41309
2	4	11,83967	13,32915	15,06273	16,50919	12,42652	14,77958	11,64500	10,92054
2	5	11,42685	13,69290	15,27762	15,02170	9,73020	9,45788	10,53329	9,32363
2	6	8,13893	16,22416	13,28338	15,42614	11,13687	10,54493	16,22416	10,86415
3	3	14,76007	13,08172	18,96452	19,73356	8,23920	9,23322	13,20978	9,49900
3	4	11,22647	10,49384	15,30358	15,88706	9,17306	10,62377	12,65240	10,14237
3	5	9,23680	12,05921	13,61101	15,12340	8,94894	9,46797	10,43041	9,10576
3	6	8,25807	13,38011	13,03389	15,40538	7,85853	7,44445	11,57272	9,10771
3	7	17,78121	15,02058	20,23189	18,16719	9,47701	12,43130	17,63026	14,27760
4	4	11,25374	13,32909	16,52433	16,21720	11,58458	11,69789	13,90994	11,62958
4	5	7,51723	8,39086	12,54322	14,80381	5,08772	5,20877	9,30691	5,48547
4	6	11,27256	12,60627	14,28166	16,11900	10,55748	9,46687	12,87718	10,12674
4	7	11,23265	11,53800	14,27921	15,68452	11,38175	9,78347	10,89178	9,42749
5	6	8,33148	10,52100	11,10240	14,14525	10,77027	7,38477	10,83810	7,01789

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 11. Resultados evaluación bondad de predicción. ERROR MEDIO ABSOLUTO para las estimaciones de alturas en las distintas clases de diámetros y alturas.

CD	CH	MODELOS DEL ESTUDIO.							
		BRUCE	ORMEROD	G y M	M y B	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
1	3	14,54881	10,45366	11,75172	12,15366	10,73041	12,07459	13,09261	10,45366
1	5	9,27060	21,33627	21,38892	20,28812	11,79765	15,69350	16,48799	14,44434
2	3	12,14655	11,81947	12,87381	13,80316	8,83575	9,21395	11,07543	9,33856
2	4	9,28328	10,13874	11,91057	13,37751	9,52558	10,82929	9,12597	8,49209
2	5	8,95867	10,97987	12,25146	12,42464	7,33950	6,77537	8,13278	7,41916
2	6	5,77004	13,06072	11,19866	12,87425	8,85597	8,79294	13,06072	9,09234
3	3	11,90618	11,33788	14,88080	14,51602	6,34668	6,81514	10,74334	7,71815
3	4	8,76290	8,13533	11,48730	12,91633	6,38808	7,33150	9,45553	7,45394
3	5	7,39028	9,49198	10,95519	12,76808	6,81952	7,00771	8,19091	7,21707
3	6	6,27057	11,11991	10,80086	13,33493	6,01963	5,69878	9,45558	7,43946
3	7	14,65642	12,83809	16,98629	16,08955	8,06445	10,26799	14,88837	12,37833
4	4	9,23502	11,64203	12,34367	13,29544	8,90044	9,05961	11,11580	9,42667
4	5	6,10017	6,74229	9,75790	11,70567	3,88366	4,19521	7,72688	4,59951
4	6	8,21841	9,80096	11,29478	13,51382	7,83389	7,04964	9,67249	7,57375
4	7	8,83968	9,07967	10,96751	13,36656	7,83537	6,91314	8,54225	7,08978
5	6	6,70192	8,07764	8,82762	11,81841	7,89756	5,40257	8,80710	5,75021

G y M: Goulding y Murray.

M y B: Max y Burkhardt.

CD: Clases de diámetros.

CH: Clases de alturas.

CUADRO 12. Resultados de la suma de los puntajes de cada estadígrafo de predicción en las distintas clases de diámetro-altura para las estimaciones de alturas.

MODELOS DEL ESTUDIO.	SUMA DE PUNTAJES			
	DIFA	REMC	EMA	TOTAL
BRUCE	70	63	66	199
ORMEROD	72	81	86	239
GOULDIN Y MURRAY	54	111	109	274
MAX Y BURKHART	101	120	122	343
KOZAK	63	39	33	135
PEREZ	67	46	36	149
NEWNHAM	87	80	80	247
TORRUBIANO	62	36	44	142

CUADRO 13. Resultados evaluación bondad de predicción. DIFERENCIA AGREGADA para las estimaciones de altura por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	-1,45474	-0,08542	1,27675	2,16484	0,74136
1	-4,41483	-13,78817	-32,88261	-72,60371	-60,26655
2	7,70802	-7,65800	2,77472	-10,75288	-9,30465
3	4,69079	-5,65323	9,39682	8,29768	3,20900
4	2,15087	-2,96685	6,64146	12,38739	4,79663
5	1,82940	0,27372	3,81890	12,31630	5,63854
6	0,05866	2,05741	1,94455	8,63159	4,98115
7	-2,38115	2,28667	0,69560	3,86965	3,18572
8	-4,36330	1,55684	0,08543	-0,00747	0,88805
9	-4,87042	0,14595	-0,38611	-2,07620	-1,17069
10	-2,63594	0,17328	0,34208	-1,23367	-0,77593

CUADRO 14. Resultados evaluación bondad de predicción. RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO para las estimaciones de alturas por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	11,53954	10,58491	10,20593	12,69026	10,32200
1	50,35357	90,70706	79,01238	99,29051	85,64849
2	42,44639	50,99556	36,35455	28,38497	31,34804
3	28,34300	27,17257	25,46710	20,70565	20,95395
4	18,49505	15,32057	18,39037	20,32833	15,95176
5	13,67264	9,89358	12,71112	18,77767	12,96132
6	9,69419	7,62222	8,58434	14,61956	10,42047
7	6,72176	5,71208	5,34883	9,21911	7,28935
8	6,54488	4,83101	4,25660	6,27352	5,42551
9	6,06041	3,82615	3,52387	4,67577	4,16316
10	3,19730	2,10672	2,05610	2,26378	2,09315

CUADRO 15. Resultados evaluación bondad de predicción. ERROR MEDIO ABSOLUTO para las estimaciones de alturas por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	8,58756	7,53335	7,31577	9,49855	7,72906
1	29,82348	52,12886	49,01324	74,69020	62,93910
2	32,86560	39,14541	26,89178	21,80840	22,69802
3	20,81559	21,02190	20,30083	15,76046	15,69643
4	13,87995	12,11432	14,47662	15,82691	12,30425
5	10,35262	7,59131	9,40751	14,51984	9,71566
6	7,66556	5,82919	6,42785	11,62224	8,15292
7	5,64761	4,65013	4,33207	7,58780	5,99748
8	5,56775	3,82647	3,43280	5,07659	4,37366
9	5,31955	2,87993	2,64533	3,79518	3,20072
10	2,73239	1,60265	1,55634	1,90546	1,70636

CUADRO 16. Resultados de la suma de los puntajes de cada estadígrafo de predicción en las distintas porciones del fuste para las estimaciones de alturas.

MODELOS DEL ESTUDIO.	SUMA DE PUNTAJES			
	DIFA	REMC	EMA	TOTAL
BRUCE	28	39	37	104
KOZAK	21	25	24	70
PEREZ	25	20	22	67
NEWNHAM	43	39	40	122
TORRUBIANO	33	27	29	89

CUADRO 17. Resultados evaluación bondad de predicción. DIFERENCIA AGREGADA para las estimaciones de volumen por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	0,50122	-2,22878	-0,76941	2,97868	-0,57179
1	1,34882	-4,72379	-8,05211	-8,24209	-10,68441
2	2,92027	-4,63409	-0,37092	-0,66562	-1,61702
3	2,79454	-4,82953	2,74478	8,14114	2,28148
4	2,78571	-3,31777	3,12173	12,60129	4,36391
5	3,30885	0,63166	3,58926	15,42239	7,77735
6	1,02113	5,46797	3,96983	14,88080	10,43458
7	-7,35570	8,99200	3,37866	9,31607	9,97573
8	-27,44742	9,59641	1,87476	-3,69673	3,67416
9	-71,63411	4,59290	-0,34866	-28,38471	-12,84787
10	-116,35032	11,65327	16,49318	-39,56446	-17,58804

CUADRO 18. Resultados evaluación bondad de predicción. RAIZ CUADRADA DEL ERROR MEDIO CUADRÁTICO para las estimaciones de volumen por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	17,02106	22,53369	22,01738	21,66358	24,01251
1	14,05142	22,80163	24,03186	17,89329	26,85202
2	11,46737	15,25216	12,70809	11,01119	10,72998
3	12,59231	15,52721	12,41035	15,63043	11,69412
4	14,46898	14,96310	13,33671	21,02104	14,07738
5	16,17572	13,75289	14,00055	25,03382	17,34485
6	17,65529	16,45680	15,76367	27,18826	21,70802
7	20,25535	20,69292	17,92401	25,39179	23,36698
8	40,15995	29,24632	26,44621	30,72296	28,44636
9	93,76690	43,43205	43,48357	53,84397	44,54376
10	173,86814	70,89885	73,53406	86,57399	72,03587

CUADRO 19. Resultados evaluación bondad de predicción. ERROR MEDIO ABSOLUTO para las estimaciones de volumen por secciones.

SECCIÓN	MODELOS DEL ESTUDIO				
	BRUCE	KOZAK	PEREZ	NEWNHAM	TORRUBIANO
Total	10,17484	10,87546	10,67542	13,10917	11,81579
1	7,63665	11,37887	12,98418	12,08857	15,09148
2	7,47722	9,35834	8,37973	7,39235	6,96721
3	8,23207	9,66130	8,45548	10,46351	7,64316
4	9,68681	9,75378	8,84981	14,20205	9,25601
5	11,13310	9,45610	9,17071	17,15192	11,72326
6	12,78157	11,30048	10,68974	19,07044	15,17011
7	15,50018	14,94280	13,04539	19,21699	17,33555
8	31,93687	20,22364	18,65950	23,50114	20,70317
9	74,29025	28,61184	28,54348	41,41771	31,22451
10	120,22943	39,05928	39,80671	59,70650	46,72934

CUADRO 20. Resultados de la suma de los puntajes de cada estadígrafo de predicción en las distintas porciones del fuste para las estimaciones de volumen.

MODELOS DEL ESTUDIO	SUMA DE PUNTAJES			
	DIFA	REMC	EMA	TOTAL
BRUCE	29	33	32	94
KOZAK	28	26	25	79
PEREZ	18	21	20	59
NEWNHAM	41	40	42	123
TORRUBIANO	34	30	31	95