

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA

**BIOMASA AÉREA Y CONTENIDO DE CARBONO EN UNA
PLANTACIÓN DE SIETE AÑOS DE *Quillaja saponaria* Mol.
DEL SECANO INTERIOR DE CHILE CENTRAL**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANDRÉS CRISTIAN QUINTANA GARRIDO

Profesor Guía: Ing. Forestal, Dr., Sr. Gustavo Cruz Madariaga

SANTIAGO – CHILE.
2008

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA**

**BIOMASA AÉREA Y CONTENIDO DE CARBONO EN UNA PLANTACIÓN DE
SIETE AÑOS DE *Quillaja saponaria* Mol. DEL SECANO INTERIOR
DE CHILE CENTRAL**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

Andrés Cristian Quintana Garrido

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Gustavo Cruz M.	6,7
Prof. Consejero Sr. Juan Caldentey P.	7,0
Prof. Consejero Sr. Sergio Donoso C.	6,4

SANTIAGO – CHILE
2008

DEDICATORIA

A mi madre que con su amor

Y comprensión logro uno de

Sus sueños

Y

Mi padre quien es la persona

A quien yo más admiro

Gracias

Por su infinito apoyo

Y

Amor

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradezco la valiosa ayuda y comentarios realizados por mi profesor guía Dr. Señor Gustavo Cruz, profesor de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad de Chile, que gracias a sus lineamientos y gestiones la presente Memoria de Título obtuvo lo necesario, en cuanto a apoyo técnico-profesional y alcances teóricos.

También agradecer a los profesores consejeros Dr. Señor Juan Caldentey P. y Dr. Señor Sergio Donoso C. por sus correcciones, consejos, disposición y comprensión.

Además mencionar y agradecer la ayuda prestada en Alemania por el Ingeniero Forestal de nuestra casa de estudios Señor Andreas Schmidt, que con la colaboración del Internationales Institut für Wald und Holz NRW e.V. Wald-Zentrum der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, aportó con la asesoría técnica-profesional para la realización del análisis de carbono.

Agradecer el apoyo teórico prestado por el Ph. D. Señor Horacio Gilabert, profesor y experto en Biometría Forestal, del Departamento de Ciencias Forestales, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ya que con su apoyo y consejo pude realizar procesos estadísticos avanzados.

Agradecer también a Claudia S. Henicke por su apoyo y comprensión en la última etapa de trabajo.

Por último mencionar el apoyo del Laboratorio de Biomasa Forestal del Departamento de Silvicultura, de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad de Chile, en especial a Don Eric Campos.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Antecedentes Generales del Quillay (Quillaja saponaria Mol.).....	3
2.1.1 Descripción general.....	3
2.1.2 Distribución geográfica.....	3
2.1.3 Usos e importancia económica.....	3
2.2 Biomasa en Componentes Arbóreos.....	4
2.3 Métodos para la estimación de la biomasa.....	5
2.4 Aditividad en componentes de la biomasa del árbol.....	6
2.5 Funciones para la estimación de la biomasa en quillay.....	10
2.6 Estimación del contenido de carbono en especies forestales.....	11
3. MATERIAL Y MÉTODO.....	13
3.1 Material.....	13
3.1.1 Ubicación del área de estudio.....	13
3.1.2 Clima.....	13
3.1.3 Relieve.....	13
3.1.4 Suelos.....	13
3.1.6 Caracterización de la plantación.....	14
3.2 Método.....	14
3.2.1 Métodos para estimar las existencias de biomasa por componente y total...	14
3.2.2 Selección de la muestra.....	14
3.2.3 Obtención de pesos secos.....	15
3.2.4 Determinación de las ecuaciones de biomasa.....	15
3.2.5 Existencias de biomasa.....	17
3.2.6 Determinación del contenido de carbono.....	17
3.2.6.1 Método de determinación de densidad básica.....	18
3.2.6.2 Análisis contenidos de carbono.....	18

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1 Caracterización de la muestra.....	19
4.2 Significancia de las variables.....	19
4.3 Selección y ajuste de los modelos de biomasa aérea por componente y total...	20
4.3.1 Análisis de los residuos.....	23
4.3.2 Aditividad de las funciones de biomasa.....	24
4.3.3 Validación de las funciones de biomasa desarrolladas.....	26
4.4 Estimación de la Biomasa de la Plantación.....	27
4.5 Acumulación de Carbono en la Biomasa Aérea.....	29
5. CONCLUSIONES.....	31
6. BIBLIOGRAFIA.....	32

RESUMEN

Se realizaron funciones de biomasa para árboles provenientes de una plantación de siete años de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), establecida en la zona semiárida de Chile Central (secano interior, VI Región), como una herramienta para el manejo silvicultural y el uso industrial de la especie, como así mismo contribuir conjuntamente a la captura de carbono.

Para la estimación de la biomasa se realizó un muestreo destructivo a 132 árboles, con el fin de obtener valores para los distintos componentes arbóreos (fuste, ramas y hojas) y para el total del árbol. Todo el material colectado fue secado en horno de aire forzado, a una temperatura de 75°C, hasta la obtención de peso constante. Para obtener el contenido de carbono por componente se utilizó el procedimiento de C/N Analyser 3000.

Se probaron 3 modelos para cada uno de los componentes estudiados, los que se ajustaron mediante técnicas de regresión no lineal. Éstos son logarítmicos y utilizan como variables predictoras el diámetro basal del fuste y la altura total. Para optar por el mejor modelo se consideró el coeficiente de determinación, el error cuadrático medio, la diferencia agregada y un análisis de residuos. La validación de las funciones se realizó por medio de una Prueba de Observaciones Pareadas.

Los valores del coeficiente de determinación son altos ($r^2 > 0,83$) e indican que existe una buena correlación entre la variable independiente usada y la biomasa de los distintos componentes estudiados. Teniendo en cuenta la gran variabilidad individual que presenta la especie, en cuanto a forma y tamaño, el error cuadrático medio ($ECM < 28,7$) de las distintas funciones puede considerarse aceptable.

Se realizó la estimación de la biomasa total por medio del análisis NSUR que resultó en general una aproximación más conservadora y aditiva para esta variable. Este método es más preciso ya que sobrestima la biomasa total en tan solo un 0,3%, lo que representa una diferencia entre la biomasa medida y estimada de solo de 0,5 g.

La plantación posee una existencia de biomasa de 3,66; 1,92; 0,95 t/ha para el fuste, las ramas y hojas respectivamente, la biomasa total determinada mediante NSUR corresponde a 6,15 t/ha, lo que representa una participación relativa en el árbol de 60, 31 y 15% para el fuste, las ramas y hojas respectivamente.

En los individuos se determinó valores promedio de carbono de 48,2; 47,6; 49,3; 48,4%, para el fuste, las ramas, hojas y total respectivamente. La acumulación de carbono para la plantación estudiada fue de 1,76; 0,92; 0,47; 2,98 t/ha, para el fuste, las ramas, hojas y total respectivamente.

Palabras Claves: *Quillaja saponaria* (quillay), Función de biomasa, Aditividad, Captura de carbono

SUMMARY

As a tool for all silvicultural handling, industrial use and contribution to the carbon capture, biomass functions were established for a seven year old plantation of quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), located in the semiarid region of Central Chile (VI Region),

A destructive sampling of 132 trees was conducted to estimate the biomass for the different arboreal components (stem, branches and leaves) and for the whole trees. All the collected material was dried in air furnace forced, to a temperature of 75°C, until the material weight is constant. The carbon content of each component was determined by using the C / N Analiser 3000 procedure.

Three Models were tested and adjusted by non linear regression techniques, for each of the studied components. The models are logarithm-based and use as predicting variables the stem basal diameter and the total height. To decide which model is the best, all the correlation coefficient, the average quadratic error, the added difference and the residual analysis were considered. The validation of the functions was conducted by performing a Test for Twin Observations.

The determination coefficients are high ($r^2 > 0.83$), which indicate a good correlation between the independent variable used and the biomass of the different studied components. Considering the great variability in shape and size that the species has, the quadratic error average (ECM < 28.7) of the different functions is acceptable.

The estimate of the total biomass was performed through NSUR analysis, resulting in a generally more moderate and additive approach for this variable. This method underestimates the total biomass in only a 0.3%, which indicates that the differences between the estimated and measured biomass are just 0.5 g.

The plantation has a biomass production of 3.66, 1.92 and 0.95 t/ha for stem, branches and leaves, respectively, total biomass determined by NSUR corresponds to 6.15 t/ha, indicating a relative share in the tree of 60, 31 and 15% for stem, branches and leaves respectively.

The average carbon contents were a 48.2, 47.6, 49.3 and 48.4 % for stem, branches, leaves and the total, respectively. For the studied plantation the accumulated carbon was a 1.76, 0.92, 0.47, and 2.98 t/ha for stem, branches, leaves and the total, respectively.

Keywords: *Quillaja saponaria* (quillay), Biomass function, Additivity, Carbon capture

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los bosques es considerado una alternativa para mitigar los efectos de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), causantes del cambio climático, particularmente el dióxido de carbono (CO₂), el gas con mayor participación y que se fija a través del proceso de fotosíntesis. Entre las alternativas para contrarrestar las emisiones de carbono (C) se cuentan el establecer plantaciones, mejorar el manejo de bosques y preservar bosques naturales (Gayoso y Schlegel, 2001).

En la actualidad el bosque esclerófilo de la zona mediterránea de Chile central se encuentra bastante degradado. Para su recuperación las plantaciones de especies nativas esclerófilas constituyen una alternativa económica, ambientalmente relevante. En particular, las plantaciones de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) podrían generar importantes retornos económicos, debido al aprovechamiento total de su biomasa para la obtención de saponinas y a su contribución simultánea para fijar carbono.

En el año 1995, se desarrolló un proceso de producción de saponina que utiliza toda la madera del árbol (San Martín y Briones, 1999), el cual desde 1997 se aplica a escala industrial, generando un mercado para la biomasa leñosa del quillay, que actualmente asciende a cerca de 5.000 toneladas anuales.

Mediante plantaciones de quillay se pretende satisfacer la demanda actual de biomasa con fines industriales y conjuntamente contribuir a la captura de carbono. Para satisfacer esta demanda es necesario contar con funciones que estimen la biomasa arbórea para los distintos componentes. Sin embargo, la mayoría de las funciones de biomasa existentes se han desarrollado en bosques naturales a partir de individuos de monte alto o bajo de la especie. Por otro lado, estas no han considerado el contenido de carbono en los distintos componentes arbóreos.

En virtud de lo anterior, esta memoria tiene como objetivo general evaluar el contenido de biomasa aérea y de carbono en una plantación de siete años de quillay del secano interior de Chile central.

Además, como objetivos específicos se plantean:

Desarrollar funciones de biomasa para los distintos componentes aéreos y total de árboles de quillay.

Determinar las concentraciones de carbono en los diferentes componentes aéreos: fustes, ramas y hojas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes Generales del Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.)

2.1.1 Descripción general

El “quillay” *Quillaja saponaria* Mol. pertenece a la familia Rosaceae y el específico “saponaria” significa “que puede usarse como jabón” (Hoffmann, 1983). Este árbol se desarrolla como monte bajo o alto, alcanzando alturas de 20 a 30 m y presenta diámetros cercanos a 1,5 m en suelos profundos y planos (Vita, 1974). Su follaje es siempreverde, con hojas cortamente pecioladas, coriáceas, simples, verde-amarillentas y algunos casos rojas anaranjadas, alternas, glabras, de forma oblonga y borde liso. Las flores son blancas, hermafroditas, solitarias con una longitud de 15 mm, y florecen entre octubre y enero. Su fruto es un polifolículo de forma estrellada, que persiste abierto por un periodo de tiempo extendido (Rodríguez *et al.*, 1983) y está compuesto de 5 carpelos sésiles; 5 estilos terminales libres; 5 folículos estrellados, coriáceos de 3 a 5 cm de ancho, su corteza es de color cenicienta y rasgada longitudinalmente (Benedetti *et al.*, 2000).

2.1.2 Distribución geográfica

El quillay se distribuye naturalmente desde la Provincia de Limarí (IV Región), hasta la Provincia del Biobío (VIII Región) (Rodríguez *et al.*, 1983). Esta especie se desarrolla en laderas de la Cordillera de los Andes, entre los 15 a los 1.600 m.s.n.m, sobre suelos graníticos depositacionales y de lomajes y cerros de la Cordillera de la Costa, prácticamente en todas las posiciones fisiográficas (Rodríguez *et al.*, 1983; Gallardo y Gastó, 1987). Debido a su extensa distribución es posible encontrarla en diversos climas a lo largo del país. Sin embargo, es más común en las zonas áridas y semiáridas, aunque también se desarrolla en lugares más fríos y húmedos, inclusive aquellos con nieves y heladas (Benedetti *et al.*, 2000).

2.1.3 Usos e importancia económica

El quillay se utiliza tradicionalmente como: combustible, artesanías, detergente y champú, producción apícola, hojarasca, silvopastoral, ornamental y medicinal. Sin embargo, su importancia económica radica fundamentalmente en la alta concentración de saponinas

en sus tejidos, las cuales tienen una gran cantidad de usos industriales en: alimentación humana y animal, agricultura, cosmética, detergentes, fotografía, minería y farmacéutica. Su aprovechamiento forestal constituye una actividad de relevancia en la zona semiárida y mediterránea de Chile (Cruz *et al.*, 2000). Además, el quillay es utilizado con fines paisajísticos, como árbol urbano, en áreas de recreación, prados y sitios arbolados (FAO, 2007).

2.2 Biomasa en Componentes Arbóreos

La biomasa se define como la suma total de materia orgánica que se encuentra en un ecosistema en un momento dado y se expresa en términos de unidades de peso seco por unidad de superficie (Newbould, 1967). La biomasa puede utilizarse para determinar la cantidad de materia viva que se encuentra disponible en un momento y ambiente determinado, además de la distribución de materia orgánica de dicho sistema (Bown, 1992).

La estimación de la biomasa de un bosque es de suma importancia pues permite estimar las cantidades potenciales de diversos productos y combustibles (carbono, saponinas, etc.) y la determinación de la eficiencia del rodal en función de las relaciones de suelo - agua - planta y nutrientes con la productividad del sitio (Pedrasa, 1989). Además, su determinación ayuda a comprender el ecosistema forestal, ya que entrega la distribución de la materia orgánica en el sistema y evalúa los efectos de una intervención, respecto a su equilibrio en el ecosistema (Teller, 1988 citado por Gayoso *et al.*, 2002).

Según Macdiken (1996), en Norteamérica, Europa y Asia se han realizado estudios que concuerdan en que la evaluación de la biomasa arbórea debe contemplar la separación de componentes en fuste, hojas y ramas; además de separar corteza y raíces. La distribución de biomasa en fustes, ramas, hojas y raíces varían considerablemente dependiendo de la especie, edad, sitio y del tratamiento silvicultural (Satoo y Magdwick, 1982). En árboles jóvenes (1 a 7 años) la mayor proporción de materia seca está en el follaje, debido a que hay una gran cantidad de hojas realizando fotosíntesis para lograr el crecimiento inicial del árbol (Kozlowski *et al.*, 1991).

Los ecosistemas forestales adultos son los que presentan mayor biomasa por unidad de superficie, debido principalmente a la acumulación de materia seca producida en los fustes. En términos porcentuales el fuste concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representando entre 55 y 77% del total; después están las ramas con 5 a 37% y por último las hojas y la corteza del fuste que se encuentran entre 1 y 15% y entre 5 y 16%, respectivamente (Pardé, 1980).

2.3 Métodos para la estimación de la biomasa

La estimación de la biomasa mediante la destrucción de árboles es un proceso que implica mucho tiempo y trabajo, especialmente en lugares de difícil acceso. Debido a esto se utilizan métodos que facilitan la labor en terreno (Satoo y Magdwick, 1982). En general se describen tres métodos para la estimación de la biomasa basados en la tala de individuos muestra:

- Método del árbol medio
- Método de razón
- Método de regresión

El método del árbol medio se basa en las mediciones detalladas de uno o más árboles que representan un tamaño promedio dentro de la parcela o la muestra. Generalmente se ocupa el árbol de área basal promedio (Satoo y Magdwick, 1982). El método consiste en el volteo y posterior medición del peso seco del árbol completo. Sobre esta base se estima la biomasa total del rodal. La ventaja de este método es la simplicidad de los cálculos, pero tiene como inconveniente las grandes subestimaciones, debido a las diferentes proporciones de hojas, ramas, corteza y fuste que tienen los árboles de distinto tamaño (Satoo y Magdwick, 1982; Toral, 1983).

El método de razón consiste en la estimación a nivel de rodal, a través de una variable auxiliar, x , que es fácil y económica de medir. El supuesto es que la relación de la variable objetivo y con la variable auxiliar x pueda ser expresada por la ecuación $y = bx$, la cual pasa por el origen, lo que implica que $y = 0$ si $x = 0$. Para que el método de razón sea efectivo es necesario que la población total de la variable auxiliar sea conocida. Por razones prácticas la medición de la variable auxiliar se hace simultáneamente con la de biomasa en las parcelas de muestreo. La biomasa del rodal es obtenida al multiplicar el

promedio muestral de la biomasa por un factor de expansión, que está representado por la razón entre la variable objetivo y la auxiliar (Pulido, 2000). Este método surge para contrarrestar el sesgo que se produce en la transformación de variables en el método de regresión. Por otra parte, el sesgo se puede estimar por la razón del promedio de las variables de la muestra, con el promedio de las variables estimadas después de la transformación logarítmica (Snowdon, 1992 citado por Pulido, 2000).

El método de regresión tiene por objeto explicar las relaciones matemáticas existentes entre los atributos y dimensiones del árbol y el peso seco de sus componentes, y es considerado el más preciso (Gayoso *et al.*, 2002). Para determinar la biomasa mediante el método de regresión es frecuente el uso de funciones alométricas cuando se ha obtenido el peso por componente o del total del árbol. Estas funciones tienen mucha aplicación en el sector forestal, debido a su gran flexibilidad. Las variables predicción más usadas son el diámetro a la altura del pecho (DAP), el diámetro a la altura del tocón (DAT), la altura total (HT) y sus combinaciones (Prado y Aguirre, 1987). Generalmente se utiliza el diámetro como variable independiente, ya que es el atributo de más fácil medición y el que presenta la mejor correlación, alcanzando valores para el coeficiente de determinación (R^2) del orden de 0,9-0,95 (Magdwick, 1992). En árboles pequeños se recomienda ocupar además la altura total o bien una combinación de ambas variables (Sato y Magdwick, 1982). Los modelos más utilizados en la estimación de biomasa de árboles se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos más utilizados en la estimación de biomasa.

Modelo	Denominación
$Y = a + b_i * x_i$	Lineal
$Y = a * e^{bx}$	Alométrico
$Y = a * x_i^{bi}$	Potencial

Fuente: Prado *et al.*, (1988).

2.4 Aditividad en componentes de la biomasa del árbol

En la estimación de la biomasa, es importante considerar la característica de la aditividad, es decir, la biomasa total del árbol debe igualar la suma de sus componentes (Parresol y Fonseca, 2001). Por lo tanto, una característica deseable de las ecuaciones alométricas de regresión, es que la suma de las predicciones para los componentes sea igual a la

predicción para el total del árbol. Según Parresol (1999), el problema de hacer aditivas las funciones de biomasa, resulta en tres pasos fundamentales de acuerdo con el orden en que se incluyen los componentes individuales:

- Suma de estimadores de las mejores funciones de regresión de cada componente
- Uso de las mismas variables independientes para la estimación de cada componente
- Forzando los coeficientes de regresión para estimar el componente total, con regresiones lineales generalizadas SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*)

El procedimiento para forzar esta propiedad en un sistema de ecuaciones de biomasa, depende de cómo se agreguen los diferentes componentes (Parresol, 1999). La metodología es flexible y se basa en el ajuste de un sistema de ecuaciones no relacionadas, formado por los modelos de los K componentes arbóreos junto con el de biomasa total. En este sistema, no es necesario que las ecuaciones de cada componente presenten la misma estructura matemática ni las mismas variables independientes. Las variables que explican el modelo de biomasa total son todas las variables regresoras que aparecen en los modelos de cada componente (Parresol y Carvalho, 2003).

$$\begin{aligned}\hat{P}_1 &= F_1(X_1) \\ \hat{P}_2 &= F_2(X_2) \\ &\vdots \\ \hat{P}_z &= F_k(X_k) \\ \hat{P}_{\text{Total}} &= F_{\text{Total}}(X_1, X_2, \dots, X_k)\end{aligned}$$

Donde:

F_i = Modelo de predicción para el peso de cada componente

P_i = Peso estimado de los componentes arbóreos

X_i = Variables explicativas comunes a todos los modelos

con $i = 1, 2, \dots, k$

Este sistema, sin relaciones analíticas entre ecuaciones, se resuelve empleando regresión NSUR (*Nonlinear Seemingly Unrelated Regression*), conocida también como mínimos cuadrados generalizados conjuntos. Se trata de una generalización del método de regresión por mínimos cuadrados ordinarios (*Ordinary Least Squares*, OLS) para un sistema de ecuaciones.

Este método asume que todas las variables predictoras son independientes, al mismo tiempo usa la correlación entre los errores de diferentes ecuaciones para mejorar la eficiencia de las estimaciones. La aditividad en este caso se garantiza imponiendo restricciones a los parámetros del modelo de biomasa total (Parresol, 1999). Además, se corrige el problema de dependencia entre los errores inherentes a las estimaciones de cada componente.

Existen dos procedimientos para hacer aditivas las funciones no lineales de biomasa de árboles (Parresol, 2001).

El método no lineal más sencillo, conocido como "procedimiento de aditividad de ecuaciones de biomasa no lineales". Consiste en ajustar de forma individual los modelos de cada componente y obtener la estimación del peso total como la suma de los modelos de todos los componentes (Parresol, 1999).

$$\begin{aligned} \hat{P}_1 &= F_1(X_1) \\ \hat{P}_2 &= F_2(X_2) \\ &\vdots \\ \hat{P}_k &= F_k(X_k) \\ \hat{P}_{\text{Total}} &= \sum \hat{P}_i = \hat{P}_1 + \hat{P}_2 + \dots + \hat{P}_k \end{aligned}$$

Donde:

F_i = Modelo de predicción para el peso de componente

P_i = Peso estimado para el componente

X_i = Variables explicativas comunes a todos los modelos
con $i = 1, 2, \dots, k$

Al emplear esta metodología, cada modelo puede incluir diferentes variables explicativas. Donde el principal inconveniente de este procedimiento es que la varianza de la estimación de la biomasa total $\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}})$ es muy elevada, puesto que su valor depende de las varianzas de las estimaciones de cada componente $\text{var}(\hat{y}_i)$, así como de las covarianzas entre estimaciones $\text{Cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j)$:

$$\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}}) = \sum_{i=1}^k \text{var}(\hat{y}_i) + 2 \sum_{i < j} \text{cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j)$$

$$\text{Cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j) = \rho_{y_i y_j} \sqrt{\text{var}(\hat{y}_i) \text{var}(\hat{y}_j)}$$

Donde:

$\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}})$ = Varianza de la estimación de la biomasa total

$\text{var}(\hat{y}_i)$ = Varianza de la estimación de cada componente

$\text{Cov}(\hat{y}_i, \hat{y}_j)$ = Covarianza entre estimaciones

$\rho_{y_i y_j}$ = Correlación entre y_i e y_j

El segundo método no lineal para hacer aditivas las funciones de biomasa, establece que la ecuación de biomasa total del árbol es una función de las variables independientes de cada una de las ecuaciones de los componentes. La valoración se hace con nuevos parámetros, con restricciones en la ecuación de biomasa total del árbol.

$$y_i = f_i(X_i, \beta_i) + \varepsilon_i, \quad i=1, \dots, k,$$

$$y_{\text{arbol}} = f_{\text{arbol}}(X_1, X_2, \dots, X_k, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) + \varepsilon_z \quad i=, 1 \dots, k,$$

Esta técnica considera la existencia de nuevas correlaciones entre los residuos de las ecuaciones, que da lugar a una variación más baja. Con esto, se especifican las características estocásticas del vector residual y las estimaciones de los parámetros son más eficientes y se obtienen intervalos más confiables para la predicción. De esta manera el sistema de ecuaciones incluye los modelos estructurales para la biomasa del fuste, ramas, hojas y árbol (Parresol y Carvalho, 2003).

2.5 Funciones para la estimación de la biomasa en quillay

Debido al interés comercial por la corteza de quillay, gran parte de los estudios de biomasa se ha centrado en este componente arbóreo, desarrollándose una serie de funciones para su estimación (Neuenschwander, 1965; Maldonado, 1967; Gajardo y Verdugo, 1977; Álvarez de Araya, 1979). Sin embargo, la mayoría de las funciones utilizadas tradicionalmente sólo estiman los rendimientos de corteza, sin considerar los demás componentes aéreos como hojas, ramas y fuste (Neuenschwander, 1965; Maldonado, 1967; Gajardo y Verdugo, 1977; Álvarez de Araya, 1979).

En la década de los años 80, se desarrollaron varias funciones de biomasa por componente para la especie (Toral, 1983; Oyarzún y Palavechino, 1984; Prado y Aguirre, 1987; Sfeir, 1990). Sin embargo, en su mayoría estas funciones tuvieron una muestra pequeña (entre 15 y 50 árboles) y utilizaron preferentemente para su construcción individuos de monte alto.

De acuerdo con lo anterior Toral (1983), estimó para un rodal de monte alto de quillay, que la biomasa presente alcanza unas 20,6 t/ha. Por otro lado, Toral y Rosende (1986) determinaron en rebrotes de quillay, que el fuste y ramas representan el 68 y 15% de la biomasa total de éstos respectivamente. Estos datos difieren con los resultados estimados por Pulido (2000), para la biomasa de los distintos componentes arbóreos de individuos de monte bajo, donde encontró una distribución de biomasa de 58, 30, 4 y 9% para fuste, ramas, hojas y corteza respectivamente. Esta diferencia se explicaría, porque los rebrotes de monte bajo tienen una mayor ramificación que los árboles de monte alto.

Duran, (2002) seleccionó modelos para estimar la biomasa de cada componente arbóreo y para el peso total de individuos de monte bajo de quillay. Éstos los comparó con los desarrollados por Prado y Aguirre (1987). La diferencia fundamental entre ambos modelos, es que el primer autor realizó una comprobación de los supuestos por el método de los mínimos cuadrados, obteniendo así un menor error estándar de estimación (EEE) y una mayor exactitud en la estimación del peso total.

Por otra parte, en un rodal con rebrotes de 7 años de edad, después de 4 años de realizado un clareo de estos, aquellos dominantes presentan una acumulación en biomasa de 4,7 t/ha, con incrementos anuales de 0,7 t/ha/año (Cruz *et al.*, 2005). Sin embargo, rebrotes clareados de quillay, de edades que fluctúan entre los 2 y 8 años, alcanzan crecimientos en biomasa de 3,0 a 4,5 kg/año. Donde los mayores crecimientos se registraron en rebrotes de 2 años de edad, y los menores en los de 8 años (Reyes, 2006).

2.6 Estimación del contenido de carbono en especies forestales

Las formaciones vegetales actúan como sumideros, es decir extraen de la atmósfera gases y los almacenan, principalmente debido a su capacidad de fotosíntesis (Ministerio del Medioambiente, 2004). Un sumidero es un ecosistema capaz de absorber más CO₂ del que emite, actuando como un reservorio de carbono.

La promulgación del protocolo de Kyoto, donde se establecen compromisos de reducción de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) para los países desarrollados (Anexo B de dicho protocolo), originó la posibilidad de incluir los proyectos de forestación y reforestación (LUCF) como una opción para mitigar las emisiones de GEI, a través de la absorción de CO₂ (Gayoso y Schlegel, 2001).

De acuerdo con lo anterior, existen prácticas como, el manejo forestal sostenible, la disminución de la deforestación y el maderero de bajo impacto que podrían disminuir las emisiones o aumentar la conservación del carbono (C). Otras prácticas, como la restauración de bosques degradados y el establecimiento de plantaciones que capturan C (Gayoso y Schlegel, 2001). Según Snowdon *et al.* (2002), la acumulación de carbono corresponde a una estimación del contenido de carbono de cada componente muestreado de la masa vegetal en estudio. La biomasa de cada componente (Bc) muestreado en un árbol se estima como el producto del peso fresco del componente (FWc) con el cociente del peso seco (DWs) y el peso fresco (FWs) del árbol.

$$Bc = FWc * \frac{DWs}{FWs}$$

El contenido de carbono de cada componente (C_c) se estima como el producto de la biomasa del componente (B_c) y la acumulación estimada de carbón (C).

$$C_c = B_c * (C)$$

Y el contenido total de carbono se estima como la suma de componentes.

$$C_{ag} = \sum_{i=1}^n C_{ci}$$

Donde:

C_{ag} : contenido de carbón sobre el suelo

C_{ci} : Contenido de carbón de cada componente

Según Gayoso *et al.* (2002), el contenido de C de la biomasa es utilizado para calcular la cantidad de C almacenado en un bosque. Para esto se debe realizar un promedio ponderado, que se obtiene de multiplicar el contenido de C del componente por su participación relativa en el árbol. Además, para hacer más cómodo el trabajo de calcular C acumulado a partir de biomasa, se debería utilizar un único coeficiente de transformación de contenido de C. Este debe someterse a un análisis de varianza que confirme la inexistencia de diferencias significativas entre los contenidos de carbono promedios de los componentes aéreos.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Material

3.1.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a una plantación de quillay ubicada en el Predio Cayru, Comuna de Pumanque, Provincia de Colchagua VI Región.

3.1.2 Clima

El clima del área corresponde a un clima mediterráneo subhúmedo, con un promedio de duración de la aridez de 6 a 7 meses, existiendo además uno a dos meses semiáridos. La temperatura media anual es de 14,5 °C, la temperatura media del mes más cálido es de 28 °C y la del mes más frío es de 3,7 °C. El régimen de precipitaciones es de tipo mediterráneo, oscilando entre 500 y 700 mm (Cruz., *et al* 2005).

3.1.3 Relieve

El relieve es de lomajes con una topografía suave, con pendientes entre 5 y 8% y diferentes exposiciones, evidenciándose un mayor desarrollo y mayor contenido de materia orgánica en la exposición sur (Cruz., *et al* 2005).

3.1.4 Suelos

El suelo pertenece a la serie asociación “La Lajuela”, derivado de materiales graníticos del cordón de cerros de la Cordillera de la Costa, profundidad de 70 cm, textura franco arcillosa y estructura en bloques subangulares medios. Los colores dominantes son rojizos en los matices 5YR y 2,5 YR. El drenaje es bueno, la permeabilidad es lenta y el arraigamiento es de 60 a 80 cm. Su clase de capacidad de uso es VI (Cruz., *et al* 2005).

3.1.5 Vegetación Natural

La vegetación corresponde al tipo forestal esclerófilo. Caracterizada por una asociación mixta en la estrata arbórea dominada por Quillay, en menor proporción se encuentra Litre (*Lithraea caustica*), Espino (*Acacia caven*) y Boldo (*Peumus boldus*). La estrata arbustiva y herbáceas son ralas y está última está dominada principalmente por xerófitas anuales (Rodríguez *et al.*, 1983; Gajardo, 1994).

3.1.6 Caracterización de la plantación

La plantación de quillay tiene una superficie de 0,8 ha y fue establecida en 1998. La preparación del sitio de plantación se realizó con arado simple. Se plantó en casillas de 20x30 cm, con plantas de procedencia local viverizadas en contenedores (bolsas). La densidad de plantación fue de 1.111 plantas/ha (3X3 m). Las labores culturales fueron control químico de malezas post plantación, fertilización post plantación (Supernitro, 20 g por planta) y protección contra ganado y lagomorfos (Corrumet en cada planta). Entre enero de 1999 y abril de 2001 se suministró riego por goteo (32 litros/planta/mes).

3.2 Método

3.2.1 Métodos para estimar las existencias de biomasa por componente y total

Para estimar la biomasa de los distintos componentes arbóreos se realizó un muestreo destructivo. En base a esta información se elaboraron funciones predictoras de biomasa utilizando el método de regresión. Para estimar la biomasa total se ocuparon el método de regresión y otro descrito por Parresol (1999), que realiza una serie de transformaciones estadísticas o matemáticas para hacer aditivas las funciones predictoras.

3.2.2 Selección de la muestra

Para la realización de las funciones se efectuó un muestreo aleatorio destructivo a una muestra de 132 árboles, que representan la frecuencia de todas las clases diamétricas, con el fin de obtener valores representativos de toda la plantación. En el Cuadro 2 se muestra la tabla de frecuencia de los árboles seleccionados.

Cuadro 2. Frecuencia de árboles seleccionados para la estimación de biomasa.

Clase diamétrica (mm)	Frecuencia
0 - 10	4
11 - 20	25
21 - 30	30
31 - 31	18
41 - 50	18
51 - 60	14
61 - 70	11
71 - 80	3
81 - 90	5
91 - 100	3
101 - 110	1

A cada árbol se le midió: largo, altura, dat (diámetro a la altura del tocón, 5 cm) y se separaron sus componentes: fuste, ramas y hojas.

3.2.3 Obtención de pesos secos

Para la obtención del peso seco de las muestras de los distintos componentes del árbol, estas fueron secadas en un horno de aire forzado a una temperatura aproximada de 75° C, hasta alcanzar peso constante. Debido a que el contenido de humedad varía entre los distintos componentes, el secado se realizó por separado. Una vez secas se pesaron en una balanza digital con precisión de 0,1g. El peso seco total de un individuo de quillay se obtuvo por medio de la adición de los pesos secos estimados para cada componente.

3.2.4 Determinación de las ecuaciones de biomasa

Una vez determinado el peso seco de cada uno de los componentes arbóreos, se procedió a probar distintos modelos de regresión, como son el lineal, alométrico y potencial, expuestos en el cuadro 1 del punto 2.3.

Cada uno de estos modelos fue probado para cada componente estudiado, entre los cuales se utilizaron modelos con una variable predictora (Dat) y con más de una variable predictora (Dat - Ht).

Para optar por el mejor modelo se consideró:

- El mayor coeficiente de determinación (R^2)
- El menor error cuadrático medio (ECM%)
- La menor diferencia agregada (DIFA%)¹
- Un análisis de residuos (Prueba de Park)

La validación de las funciones se realizó por medio de una Prueba de Observaciones Pareadas. Para estos fines se utilizaron 13 árboles muestras (10%) de todas las clases de tamaño que no fueron utilizados en el desarrollo de las funciones que se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Árboles muestra para la validación de las funciones.

Árbol N°	Dat (mm)	Altura (mm)
1	12	750
2	14	750
3	18	600
4	26	2,000
5	30	1,450
6	35	1,650
7	38	1,250
8	50	2,800
9	50	1,700
10	66	2,450
11	70	2,300
12	82	1,910
13	95	2,710

Se determinó la aditividad de las ecuaciones de biomasa por medio del método NSUR que es un procedimiento de aditividad de ecuaciones de biomasa no lineales. Para este método se ajustaron inicialmente todas las ecuaciones usando mínimos cuadrados ordinarios (OLS), donde se determinó la matriz de varianzas-covarianza para β (apéndice 3), a continuación, basándose en ella, se realizó la regresión con mínimos cuadrados generalizados conjuntos y se determina la matriz de covarianza del error entre ecuaciones. Enseguida se calculó un intervalo de confianza para un valor estimado de \hat{y}_i , con probabilidad de $100(1 - \alpha) \%$ y el factor de corrección con las siguientes expresiones:

Estimación de las i ecuaciones: $\hat{y}_i = f_i(X, \beta)$

¹ Medida de sesgo, donde el valor porcentual es un indicador de si el modelo sobrestima o subestima.

Intervalo de confianza: $\hat{y}_i \pm t_{(\alpha/2)} \sqrt{\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}})}$

3.2.5 Existencias de biomasa

Las existencias de biomasa aérea por componente y total de la plantación fueron calculadas utilizando las funciones de estimación seleccionadas y el método NSUR. Se determinó la biomasa por componente y total para las diferentes clases diamétricas y se expandió a toda la superficie mediante el número total de árboles.

3.2.6 Determinación del contenido de carbono

Para determinar el contenido de carbono se tomaron 12 muestras, con 4 muestras por cada componente aéreo; fuste, ramas y hojas. Dicha muestra compuesta, se conformó por la mezcla homogénea de la totalidad de los componentes de los árboles estudiados. Posteriormente de cada muestra por componente se extrajo una submuestra aleatoria, conformada por diez repeticiones de 5 g cada una. Cada submuestra fue molida en un molino de discos (marca Jürgens), hasta obtener el tamaño de partícula apto para ser analizado por el procedimiento de C/N Analyser 3000. Este procedimiento consiste que en un cartucho de Zinc, se le introducen de entre 3 a 6 mg de muestra, obteniéndose el P_1 (peso 1). Luego dentro de la máquina de análisis de C/N, la muestra es quemada quedando diversas trazas de elementos, obteniéndose el P_2 (peso 2). En función de P_1 y P_2 se obtiene el porcentaje de carbono. El contenido de carbono de los fustes con diámetros mayores, se obtuvo mediante la proyección de la densidad de la madera, al volumen total de la troza.

3.2.6.1 Método de determinación de densidad básica

Para determinar la densidad básica de la madera de quillay, se cortaron 24 probetas de 12 trozas, con forma cúbica de 1,0 cm por lado, correspondientes a 2 repeticiones por árbol. Estas probetas fueron secadas en un horno de aire forzado a una temperatura aproximada de 75° C, hasta alcanzar peso constante. Éstas una vez secas se pesaron en una balanza digital con precisión de 0,01g. Para determinar el volumen (cm^3) de las probetas, se utilizó un Volumenómetro de Breuill (Gutiérrez y Cisternas, 2006). Para estos

fines, éstas se saturaron previamente en agua y posteriormente se sumergieron en mercurio. La densidad básica, ρ_b de cada probeta, en (g/cm^3) se calculó como:

$$\rho_b = \frac{p_o}{v_o}$$

Donde:

p_o : es el peso en gramos de la probeta en la condición anhidra.

v_o : es el volumen en cm^3 de la probeta al contenido de humedad máximo.

3.2.6.2 Análisis contenidos de carbono

Se analizaron los datos para determinar si existían diferencias significativas entre componentes. Para este análisis se realizó la prueba de Kolmogorov-Esmirnov para ver si las varianzas se distribuían homogéneamente y un análisis de varianza para determinar si existían diferencias entre componentes.

Una vez obtenido el contenido de carbono, este factor fue ponderado por la biomasa de cada componente. Para estimar el contenido de carbono promedio de la plantación, se pondero el contenido de carbono por la biomasa total de la plantación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la muestra

En el cuadro 4, se presenta un resumen de las estadísticas descriptivas básicas de cada variable estudiada en los árboles muestreados.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las variables dependientes y predictoras.

	Ht (mm)	Dat (mm)	Peso Fuste (kg)	Peso Ramas (kg)	Peso Hojas (kg)	Peso Total (kg)
Promedio	1.507	39	0,70	0,44	0,24	1,40
S	747	21	0,93	0,66	0,29	1,80
Mínimo	350	9	0,01	0,00	0,00	0,02
Máximo	3.900	110	4,54	3,05	1,39	8,48
CV	0,5	0,55	1,33	1,48	1,18	1,28

S = Desviación estándar

Es posible señalar que las variables predictoras determinadas en terreno para los árboles muestreados presentan coeficientes de variación menores que las variables dependientes obtenidas en laboratorio. Por otra parte, el fuste representa cerca del 50% del peso total, las ramas el 32% y las hojas el 17%.

4.2 Significancia de las variables

Para la zona en estudio, la matriz de correlación muestra un alto nivel de significancia entre los pesos secos de los distintos componentes y las variables predictoras Dat, Ht, y sus combinaciones, dichas correlaciones oscilan entre 65 y 95%. En el cuadro 5 se presentan las mejores correlaciones entre variables dependientes y predictoras.

Cuadro 5. Matriz de correlación entre variables dependientes y predictoras ($P < 0,05$).

	Peso	Peso	Peso	Peso
	Fuste (kg)	Ramas (kg)	Hojas (kg)	Total (kg)
Ht (mm)	0,82	0,65	0,66	0,78
Dat (mm)	0,87	0,84	0,83	0,89
Dat ²	0,89	0,87	0,81	0,91
Dat*Ht	0,95	0,82	0,78	0,92

El uso del diámetro a la altura del tocón (Dat) como variable independiente tiene ventajas, ya que es el atributo de más fácil medición y el que presenta la mejores correlaciones para hojas y ramas, 83 y 87% respectivamente. Sin embargo, para fuste y peso total las mejores correlaciones fueron de la combinación de Dat*Ht con valores de 95 y 92% respectivamente.

4.3 Selección y ajuste de los modelos de biomasa aérea por componente y total

De acuerdo con la metodología empleada se desarrolló una ecuación de peso seco total y por componente en función del Dat y Ht, se seleccionó la siguiente función general para la estimación de biomasa:

$$Y = a * X^b,$$

Donde: X, es la variable predictora

En el cuadro 6 se presenta la estimación de la biomasa aérea y las funciones que mejor la representan.

Cuadro 6. Resultados del ajuste de ecuaciones de peso seco en función del Dat y Ht.

Componente	Función Seleccionada	R ²	ECM%	DIFA%
Fuste	$Y = 0,0000002442 * (\text{Dat} * \text{Ht})^{1,31163}$	0,96	28,8	0,04
Rama	$Y = 0,00001287 * (\text{Dat}^2)^{1,3254}$	0,83	35,8	15,90
Hoja	$Y = 0,00005690 * (\text{Dat}^2)^{1,0855}$	0,85	18,1	6,70
Total	$Y = 0,000008253 * (\text{Dat}^2)^{0,61781} * (\text{Dat} * \text{Ht})^{0,65135}$	0,95	72,1	-8,16

Se observa del cuadro 6, que las funciones ajustadas presentan un coeficiente de determinación (R²) mayor para fuste y total con valores superiores al 0,95, a diferencia de ramas y hojas que presentan valores menores a 0.85. Para los diferentes componentes arbóreos y el total de biomasa el error cuadrático medio (ECM%), estuvo entre el 18 y el 72% que puede considerarse aceptable por las características propias de la especie y a la estimación de biomasa. La diferencia agregada porcentual es positiva para los componentes, lo que significa una tendencia a subestimar la biomasa, pero en general los valores estimados no superan el 16% en todas las funciones. En cambio para la biomasa total la diferencia agregada es negativa lo que demuestra una leve sobreestimación de la biomasa, la cual no supera el 8 %.

En el cuadro 7, se presentan las transformaciones logarítmicas de las funciones seleccionadas, con este procedimiento se reduce la heterocedasticidad de la ecuación seleccionada. Para hacer más precisa la predicción, cada modelo se corrigió mediante la semisuma del error cuadrático medio (ECM/2) (Flewelling y Pienaar 1981). El ECM% fue calculado con el 10% de la muestra que no se ocupó para ajustar las funciones, esto para no inducir los resultados. Caldentey (1990), asegura que las funciones no deben superar el 30%, por lo que los valores estimados son validos, ya que éstos están bajo el 28%. En comparación con las estimaciones determinadas por (Cruz., *et al* 2005), los ECM% determinados para la misma localidad son similares para el fuste y rama, en cambio para la hoja y biomasa total es un 3% y un 1% menor respectivamente. Esto se debe al factor de corrección C que aumenta la precisión de las funciones.

Cuadro 7. Transformación logarítmica para las funciones.

Componente	Transformación Logarítmica	ECM%
Fuste	$\ln(y) = -15,2251 + 1,31136 * \ln(\text{Dat} * \text{Ht}) + C$	15,5
Rama	$\ln(y) = -11,261 + 1,3254 * \ln(\text{Dat}^2) + C$	16,7
Hoja	$\ln(y) = -9,7741 + 1,0855 * \ln(\text{Dat}^2) + C$	5,5
Total	$\ln(y) = -11,704851 + 0,61781 * \ln(\text{Dat}^2) + 0,65135 * \ln(\text{Dat} * \text{Ht}) + C$	28,7

C= Factor de corrección, ECM/2

En la Figura 1, 2, 3 y 4 se ilustra el comportamiento de las curvas de biomasa para la plantación en función del Dat^2 y $\text{Dat} * \text{Ht}$. Se puede apreciar que las curvas se comportan de acuerdo al patrón esperado.

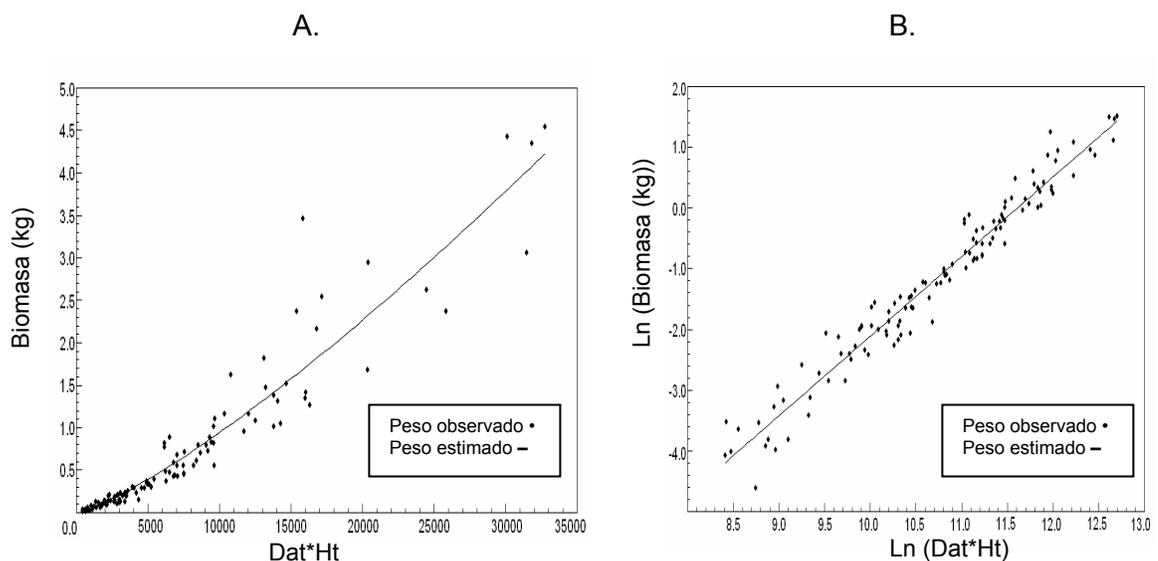


Figura 1. A: Función de biomasa seleccionada para la biomasa del fuste. B: Función Linealizada para la biomasa del fuste.

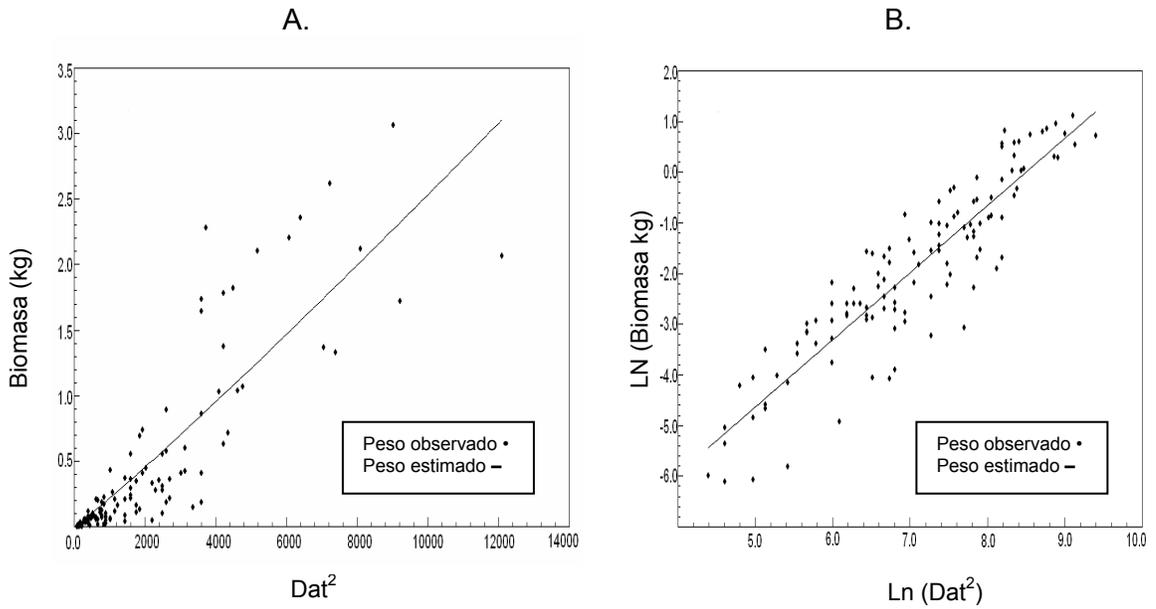


Figura 2. A: Función de biomasa seleccionada para la biomasa de las ramas. B: Función Linealizada para la biomasa de las ramas.

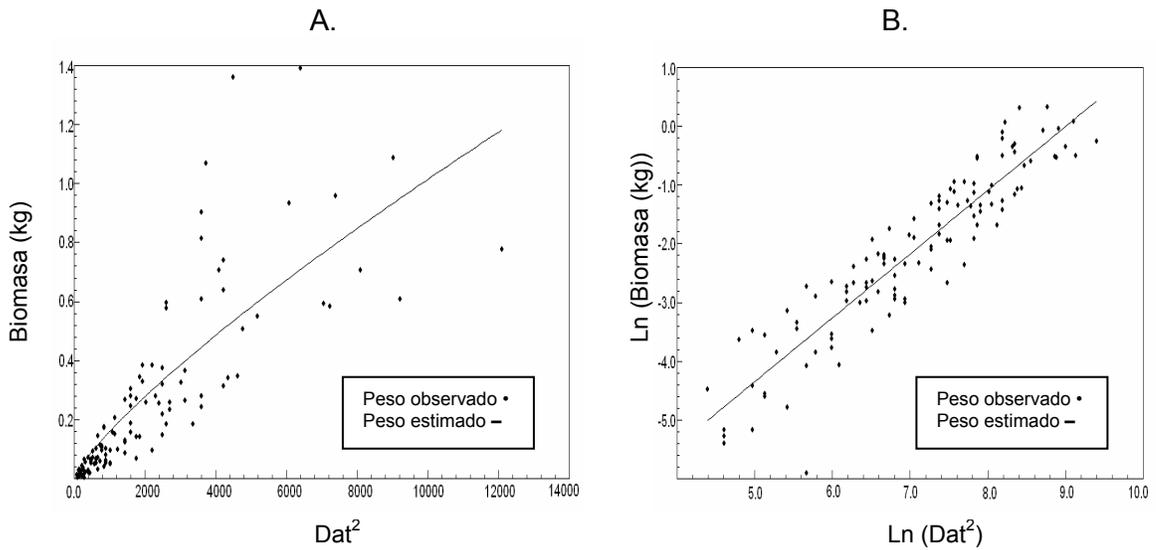


Figura 3. A: Función de biomasa seleccionada para la biomasa de las hojas. B: Función Linealizada para la biomasa de las hojas.

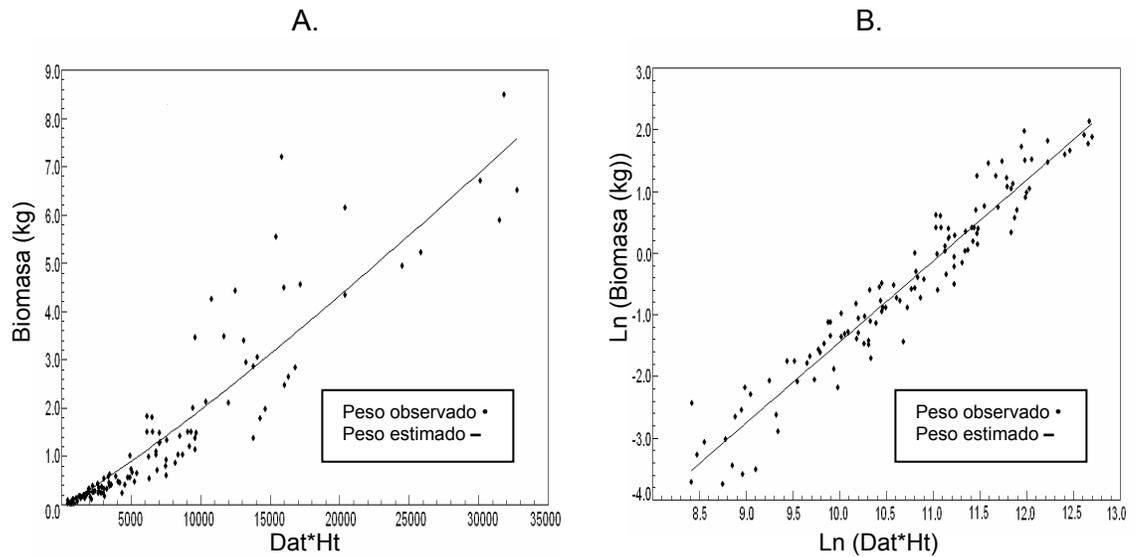


Figura 4. A: Función de biomasa seleccionada para la biomasa total. B: Función Linealizada para la biomasa total.

4.3.1 Análisis de los residuos

Los residuos de los componentes de peso seco se distribuyen homogéneamente a ambos lados del valor 0, indicando que se presenta un ajuste no sesgado y otorgándole consistencia al modelo ajustado. El análisis gráfico verificó la presencia de homocedasticidad, confirmado por la Prueba de Park. Al mismo tiempo, es posible apreciar un buen comportamiento de los residuos con respecto a la variable predictora, donde las mayores diferencias se observan en los diámetros mayores alcanzando valores de 1,5 kg/árbol (Figura 5).

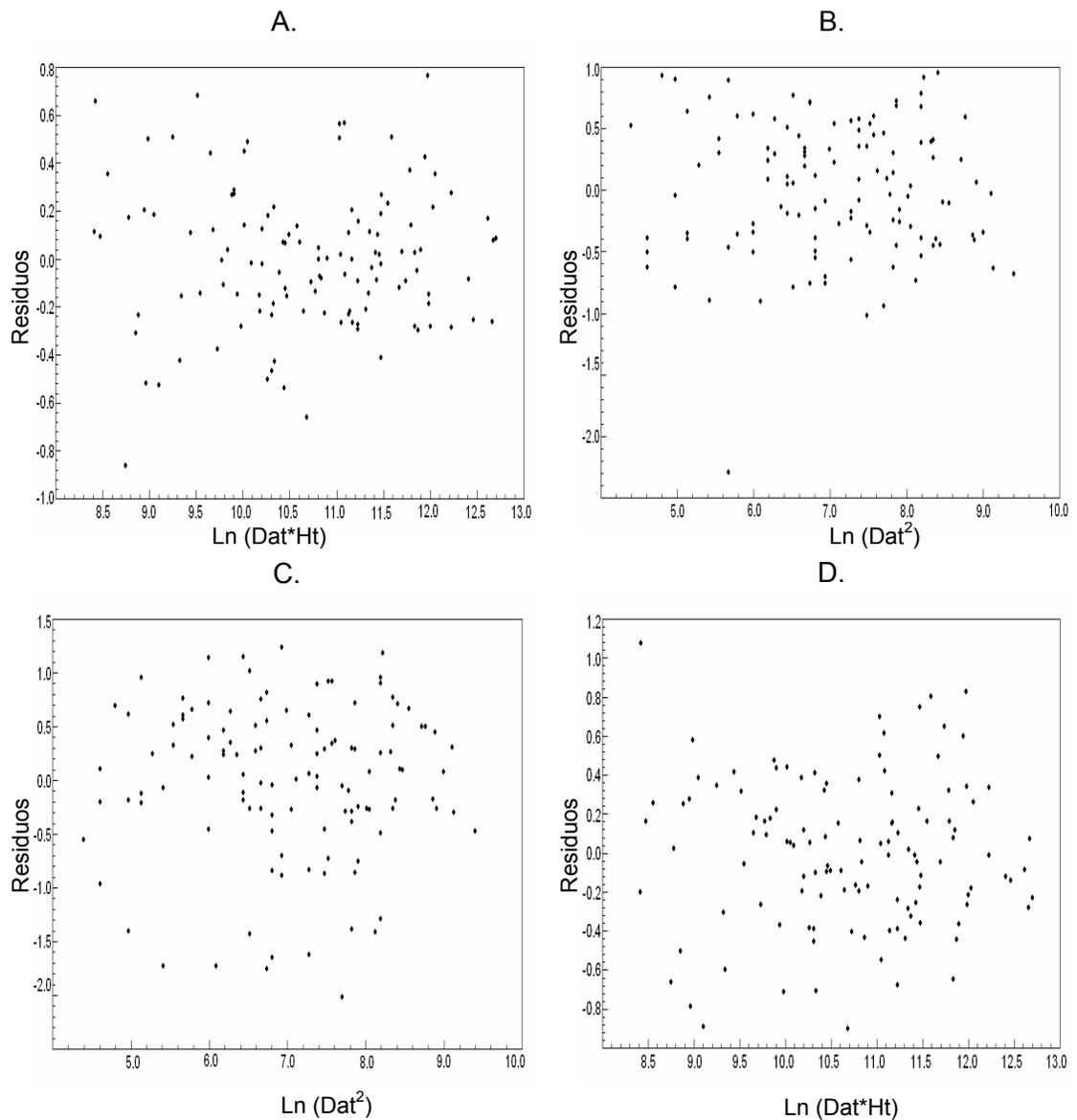


Figura 5. Distribución de Residuos de la funciones ajustadas para A: peso seco del fuste B: peso seco de las hojas C: peso seco de las ramas D: peso seco total

4.3.2 Aditividad de las funciones de biomasa

Debido a que las funciones de biomasa de cada componente, utilizan variables independientes distintas para cada uno de ellos, las funciones no son aditivas, por lo que la estimación del total de la biomasa de un árbol no es igual a la sumatoria del peso seco de los distintos componentes. Sin embargo, el proceso descrito por Parresol (1999), para hacer aditivas las funciones no lineales de biomasa, denominado modelo NSUR permite

en general una mejor predicción para la biomasa total. La biomasa total estimada y observada de cada componente y para el total de biomasa se presenta en el cuadro 8.

Cuadro 8. Biomasa total observada y estimada por las distintas funciones y el modelo NSUR para los tres componentes y total para quillay.

Componente	Biomasa total estimada (kg)			
	Observada	Función No lineal	Función Linealizada +C	Modelo NSUR
Fuste	83,78	80,41	83,87	79,90
Rama	53,46	44,95	57,53	44,06
Hoja	29,53	27,54	31,67	27,43
Total	166,79	180,05	191,40	167,31

Los valores de biomasa total, para cada uno de los componentes fueron similares para las funciones no lineales y NSUR. Las funciones no lineales seleccionadas subestiman la biomasa para los tres componentes en promedio el 9%, mientras que para la biomasa total se sobreestimó el 8%. La función lineal con factor de corrección C (ECM/2) sobreestima la biomasa para los tres componentes, en promedio el 5%, además para la biomasa total sobreestimó el 15%. El modelo NSUR subestima la biomasa en promedio el 10% para los tres componentes, en cambio para la biomasa total sobrestima en 0.3%, (véase, cuadro 8). La diferencia entre la biomasa medida y estimada con NSUR es solo de 0,5 g.

En la Figura 6 se presentan las estimaciones realizadas mediante la función de predicción para la biomasa total, NSUR y la biomasa observada.

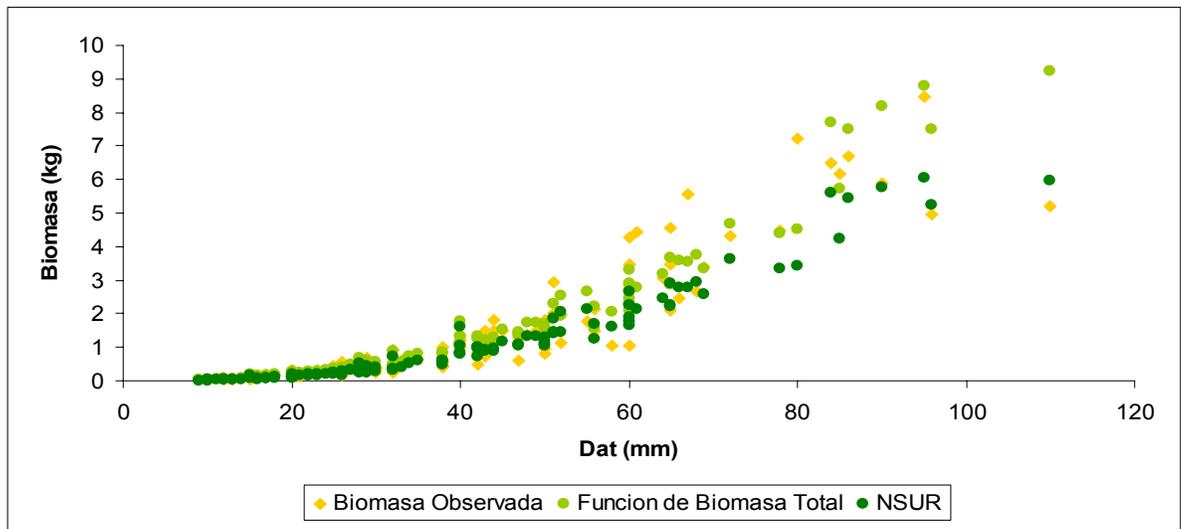


Figura 6. Comparación entre la estimación de biomasa total con la función seleccionada no lineal y NSUR v/s la biomasa observada.

Las estimaciones entregadas por la función de biomasa seleccionada, son mayores que la biomasa observada en promedio el 20%. Sin embargo en el grafico se puede observar que en las clases de Dat menores, la diferencia es mínima, no así en las clases superiores donde la diferencia es el 75% para la función seleccionada y 15% para NSUR. El total de biomasa estimada con la función de predicción para la biomasa total es, en promedio, 30% mayor que la biomasa estimada con NSUR.

4.3.3 Validación de las funciones de biomasa desarrolladas

En el cuadro 9 se presenta la validación de las funciones desarrolladas, es posible asegurar que no existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los valores reales y los estimados para los pesos secos totales de los ajustes correspondientes.

Cuadro 9. Resultados de la validación de las funciones en base a una Prueba de Observaciones Pareadas.

Función	Grados Libertad	Valor estadística de prueba	Valor critico T al 95%
Fuste	12	0,123	1,78
Ramas	12	-0,059	1,78
Hojas	12	-0,054	1,78
Total	12	0,027	1,78

4.4 Estimación de la Biomasa de la Plantación

La biomasa aérea de la plantación (t/ha) determinada para los componentes fuste, ramas, hojas y total con los modelos seleccionados se presenta en el cuadro 10.

Cuadro 10. Biomasa estimada (t/ha) para los componentes fuste, rama, hoja y total para la plantación de quillay.

	Función No lineal	Función Linealizada + C	Modelo NSUR
Biomasa Fuste (t/ha)	3,66	3,81	-
Biomasa Ramas (t/ha)	1,92	2,46	-
Biomasa Hojas (t/ha)	0,95	1,03	-
Biomasa Total (t/ha)	7,73	8,81	6,15(*)
Σ Biomasa de Componentes	6,53	7,30	6,53
Diferencia	1,20	1,51	0,38

(*) Valor obtenido de la suma de los componentes (\hat{y}_i), corregida con el factor de corrección: $\hat{y}_i \pm t_{(\alpha/2)} \sqrt{\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}})}$

El modelo generado con el procedimiento de aditividad de funciones de biomasa no lineales NSUR, para la biomasa total de la especie quillay, tiene la ventaja de que su ecuación general resulta en la suma de las estimaciones por componente, corregidos por el factor de corrección ($\sqrt{\text{Var}(\hat{y}_{\text{total}})}$) (Parresol, 1999).

Debido a que esta relación en general presentó un mejor ajuste, existe una menor diferencia entre la biomasa total estimada con NSUR y la suma de las predicciones por componente. Esta diferencia para la biomasa total de la plantación de quillay calculada con NSUR asciende a 0.38 ton/ha, no siendo significativa ($p < 0,05$) respecto a la estimada por la suma de los componentes. Esta diferencia es adecuada para la estimación de la biomasa aérea en plantaciones de quillay establecidas en el secano interior de la zona central de Chile.

Estos resultados se asemejan a los encontrados por Pulido (2000), para biomasa aérea de un rodal natural de quillay de monte bajo, localizado en la misma Comuna de Pumanque. Este estudio determinó una participación relativa en el árbol para fuste, ramas y hojas de 58, 30 y 4% respectivamente, lo cuales, se asemejen con los 60 y 31% obtenidos para fuste y ramas estimados por este estudio. Sin embargo, existen diferencias respecto a la participación de hojas (15% en este estudio). Esto se debería principalmente a la arquitectura de monte bajo del rodal estudiado por Pulido (2000). Por otro lado, las labores culturales y riego inicial suministrados a la plantación en sus

primeros años de establecimiento, incrementaría la existencia de biomasa de hoja, mejorando el rendimiento de la plantación, esto debido a la mayor capacidad fotosintética y aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el suelo.

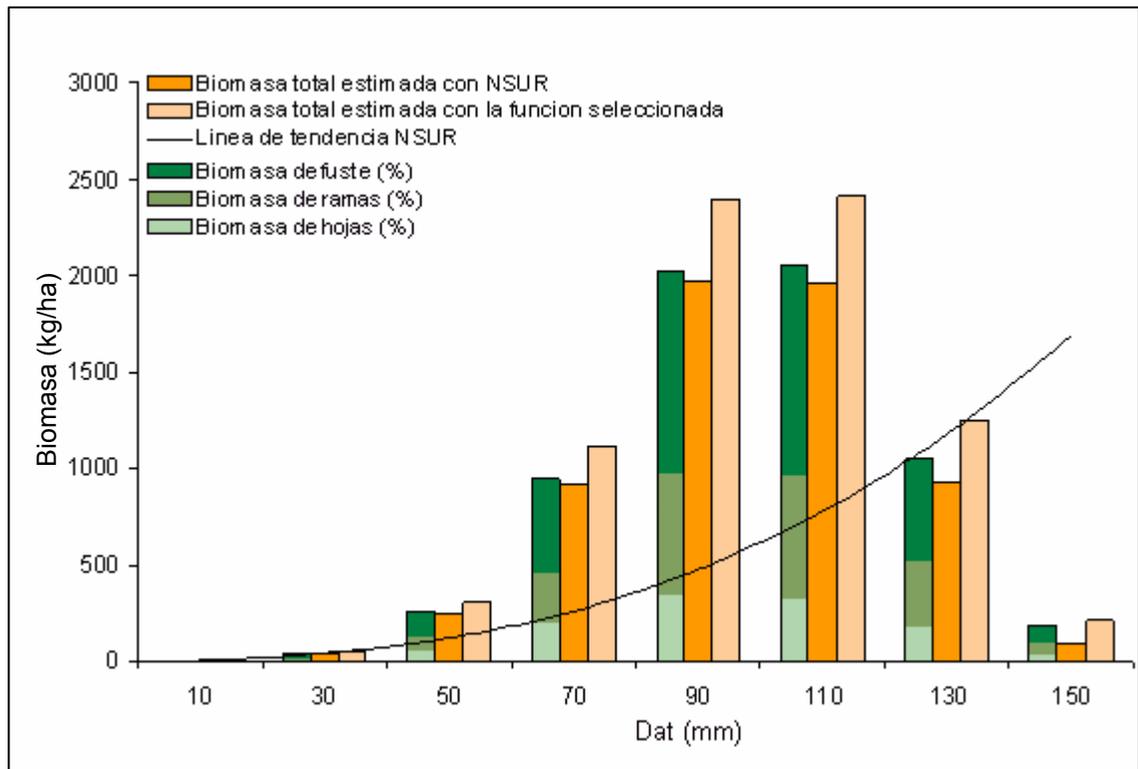


Figura 7. Biomasa aérea por clase diamétrica estimada por componente y total para una plantación de siete años de quillay.

Se puede apreciar en la figura 7, que la biomasa aérea total de quillay determinada con NSUR, es una estimación más conservadora que la estimada con una función de biomasa total y se acerca más a la aditividad de las funciones.

4.5 Acumulación de Carbono en la Biomasa Aérea

El contenido de carbono de los distintos componentes arbóreos se determinó para estimar la acumulación de carbono en la plantación de quillay. Al respecto no se detectaron variaciones importantes en los distintos componentes analizados. El contenido de carbono orgánico para los distintos componentes se presenta en el cuadro 11, expresado como el porcentaje promedio de las muestras analizadas.

Cuadro 11. Contenido de Carbono (%), de los componentes en estudio para la especie *Quillaja saponaria* Mol.

	Fuste	Ramas	Hojas	Total
Numero de muestras	10,00	10,00	10,00	30,00
Promedio	48,16	47,64	49,30	48,37
Máximo	50,49	49,51	53,29	53,29
Mínimo	46,44	46,16	46,43	46,16
Desviación	1,28	1,09	2,52	1,83
Varianza	1,63	1,18	6,36	3,34
C V	0,02	0,02	0,05	0,03

De acuerdo con la prueba de Kolmogorov–Esmirnov, es posible asegurar ($p < 0.05$) que las varianzas se distribuyen homogéneamente (apéndice 5). Cumplido el supuesto de homogeneidad, se realizó un análisis de varianza para los contenidos de carbono por componente, determinándose que no existen diferencias significativas ($p < 0.01$) entre el contenido de carbono de éstos.

Al comparar los resultados obtenidos por Gayoso *et al.* (2002), para especies de latifoliadas nativas de los bosques templados de Chile, se obtuvo valores menores al 50% que es el valor entregado por la IPCC (1996) para el carbono orgánico. Sin embargo los valores determinados por el autor fueron menores a los entregados en esta investigación, ya que para especies latifoliadas el contenido de carbono promedio fue de 43.3%, encontrándose una diferencia de 5 puntos porcentuales.

Para determinar la cantidad de carbono almacenado por componente y total para la plantación. Se utilizó la biomasa estimada para cada componente, ponderado con su respectivo valor de contenido de carbono. Para la biomasa total se determinó un valor único de contenido de carbono (promedio general). En el cuadro 12 se observa la cantidad de carbono almacenado por componente y total para la plantación.

Cuadro 12. Acumulación de Carbono (t/ha), para los componentes y total para una plantación de siete años de *Quillaja saponaria* Mol.

Componente	Biomasa	Contenido de Carbono	Acumulación de Carbono (t/ha)
Fuste (t/ha)	3,66	48,16	1,76
Ramas (t/ha)	1,92	47,64	0,92
Hojas (t/ha)	0,95	49,30	0,47
Total (t/ha)	7,73	48,37	3,74
Total NSUR (t/ha)	6,15	48,37	2,98

El mayor contenido de carbono, se presenta en las hojas con 49,3%, seguido por fuste con 48,2% y las ramas con 47,6%, se diferencian con los resultados obtenidos por Gayoso *et al.* (2002), donde el mayor contenido de carbono, se presentó en el fuste con 44,4%, seguido por las hojas con 43,7% y por ultimo las ramas con el 43,2%. Este menor valor obtenido podría deberse al método que se empleó (colorimétrico), el cual evalúa solo la fracción orgánica del material analizado, a diferencia del procedimiento C/N Analyser 3000, usado en este estudio, el cual además evalúa componentes inorgánicos del material como el nitrógeno.

La mayor acumulación de carbono para la plantación se presenta en el fuste, ya que presenta la mayor concentración de biomasa. Mediante la densidad básica de la madera de quillay (apéndice 5) es posible estimar el contenido de carbono sólo a partir de volumen fustal. Esto es relevante, debido a que en muchos casos sólo se cuenta con esta información.

La densidad básica para la madera de quillay establecida en plantaciones en el secano interior de Chile central, es de 0,551 t/m³, por lo que existe un volumen de acumulación de carbono para el fuste del orden de 3,19 m³/ha.

Al comparar el carbono obtenido con NSUR y la función de biomasa total se deduce que es una determinación más conservadora y resulta adecuada para desarrollar la venta de bonos de carbono para la zona del secano interior de Chile central.

5. CONCLUSIONES

En plantaciones de quillay, la variable que mejor se ajustó para estimar la biomasa de los componentes fuste y total, fue la combinación de $Dat \cdot Ht$, que arrojó correlaciones mayores a 96%, a diferencia de hojas y ramas que fue solo Dat con valores mayores a 83%.

El modelo que mejor predijo los pesos secos de los componentes, es el modelo potencial, encontrándose valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0,96 y (ECM%) entre 5,47 y 28,7%. Además, la diferencia agregada para los distintos componentes arbóreos se encuentra dentro de rangos aceptables, de 0,04 a 16 % que indicaría una tendencia a subestimar los pesos secos. Sin embargo, para la biomasa total el valor es de -8,16%, que indicaría una tendencia a sobreestimar la biomasa.

La estimación de la biomasa total por medio del análisis NSUR resultó en general una aproximación más conservadora y aditiva. Obteniendo un aumento en la estimación de la biomasa total de solo 0,3%, por lo que la diferencia entre la biomasa medida y estimada es de 0,5 g.

La plantación tiene una existencia en biomasa de 3,66; 1,92; 0,95 t/ha para el fuste, las ramas y hojas respectivamente, la biomasa total determinada mediante NSUR corresponde a 6,15 t/ha. Estos valores representan una participación relativa del árbol de 60, 31 y 15% para fuste, ramas, hojas respectivamente.

El contenido de carbono promedio, para el fuste, las ramas y hojas de los individuos de quillay no presentó diferencias significativas. La acumulación de carbono para la plantación fue 1,76; 0,92; 0,47; 2,98 t/ha, para el fuste, las ramas, hojas y total respectivamente.

Al comparar el carbono obtenido con NSUR y la función de biomasa total se deduce que es una determinación más conservadora y resulta adecuada para desarrollar la venta de bonos de carbono para la zona del secano interior de Chile central.

6. BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ DE ARAYA, G. 1979. Tabla de rendimiento de corteza de Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.). Pontificia Universidad Católica de Chile. Sede regional del Maule. 15 p.

BENEDETTI, S., DELARD, C. y ROARCH, F. 2000. Quillay: Una alternativa multipropósito para la zona central. Documento Divulgativo 20. Proyecto PRODECOP SECANO-INFOR-FIA. Santiago. Chile. 12p.

BOWN, H. 1992. Biomasa en bosques de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) en la Provincia de Última Esperanza, XII Región. Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 75 p.

CALDENTEY, J. 1990. Productividad de los bosques esclerófilos y espinosos. En: Opciones Silviculturales de los Bosques Esclerófilos Espinosos de la Zona Central de Chile. Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Agraria y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Apuntes Docentes N° 3. 27-38 p.

CRUZ, G; ARELLANO, E. y PULIDO, A. 2000. Innovaciones en el manejo y uso industrial del quillay. *Agronomía y Forestal UC* (6): 21-25.

CRUZ, G.; BRAVO, R.; HIDALGO, F. y CABELLO, G. 2005. Informe de gestión año 2005: Presentación de resultados y descripción de ensayos. Documento Técnico. Convenio CONAF VI Región- Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile. 18p.

DURAN, P. 2002. Funciones de biomasa para la especie Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) en localidades de VII Región. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Talca, Chile. 33 p.

FAO. 2007. Estado actual de la información sobre árboles fuera del bosque. [En línea]. <http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/006/AD403S/AD403s04.html>. [Consulta: 10 de Marzo del 2007].

FLEWELLING, J. y PIENAAR, L.V. 1981. Multiplicative regression with lognormal errors. *Forest Science* 27: 281-289.

GAJARDO, M. y VERDUGO, R. 1977. Rendimientos en hojas de Boldo (*Peumus boldus* Mol), corteza de Quillay (*Quillaja saponaria* Mol) y carbón de Espino (*Acacia caven* Mol) en la V región. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. 93 p.

GAJARDO, R. 1994. La vegetación natural de Chile: Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. 165p.

GAYOSO, J. y SCHLEGEL, B. 2001. Guía para la formulación de proyectos forestales de carbono. Proyecto FONDEF D9811076 Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ciencias Forestales. 15 p.

GAYOSO, J., GUERRA, J. y ALARCON, D. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF D9811076 Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ciencias Forestales.

GALLARDO, S. y GASTO, J. 1987. Estado y planteamiento hipotético del cambio de estado del ecosistema de (*Quillaja saponaria* Mol.). Santiago, Chile, Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. 248p. (Sistemas en Agricultura IISA-87 15).

GUTIERREZ, M. y CISTERNAS, A. 2006. Determinación de la densidad de la madera. Laboratorio N° 1. Física de la Madera. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Ingeniería de la Madera. 3p

HOFFMANN, A. 1983. El árbol urbano en Chile. Chile, Fundación Claudio Gay, 255 p.

KOZLOWSKI, T; KRAMER, P. y PALLARDY, S. 1991. The physiological ecology of plants. Academic Press, Inc. California, United States of America. 657 p.

MACDIKEN, K.G. 1996. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Forest Carbon Monitoring Program. [En línea]. <<http://www.winrock.org/ecosystems/files/carbon.pdf>>. [Consulta: 04 de Junio del 2007].

MALDONADO, F. 1967. Rendimiento en corteza de Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) Zona de Valparaíso. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 80 p.

MAGDWICK, H.A.I. 1992. Estimating stand weight- the importance of sample selection. New Zeland Journal of Forestry Science 21(2/3): 180-184.

MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE, 2004 Sumideros de Carbono [en línea] <http://www.mma.es/oecc/ccespana/cce_sum.htm> [Consulta: 28 de Diciembre]

NEWBOULD, P. 1967. Methods for estimating the primary production of forest. IBP. Hanbook N° 2. Blackwell Scientific Publications. Oxford. 59 p.

NEUENSCHWANDER, A. 1965. Contribución al estudio anatómico de la corteza de Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) y recomendaciones sobre su explotación. Tesis Ing. Forestal Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 121 p.

OYARZÚN, M.V. Y PALAVECHINO, V. 1984. Evaluación de especies leñosas, para ser usadas con fines energéticos, en la Provincia de Choapa, IV Región. Tesis Ing. Forestal Santiago, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago 159 p.

PARDÉ, J. 1980. Forest Biomass. Forestry Products Abstract. Review Article. Agosto1980. 3(8): 165-184.

PARRESOL, B. 1999. Assesing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisions. For. Sci. 45:573-593.

PARRESOL, B. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. Can. J. For. Res. 31, 865–878.

PARRESOL, B. y FONSECA. 2001 A new model for cork weight estimation in Northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals. Forest Ecology and Management 152 (2001) 13 I-1 39

PARRESOL, B. y CARVALHO, J. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management* 179 (2003) 269–276

PEDRASA, M. 1989. Producción de biomasa y circulación de nutrientes en un rodal de *Nothofagus alessandrii* Espinosa (Ruil) en la zona de Constitución. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 109 p.

PRADO, J. y AGUIRRE S. 1987. Funciones para la estimación de la biomasa total y de componentes del Quillay (*Quillaja saponaria* Mol). *Ciencia e Investigación Forestal* N°1: 41-47.

PRADO, J; INFANTE, P; ARRIAGADA, M. y AGUIRRE, S. 1988. Funciones de biomasa para siete especies arbustivas en la IV Región. FO: DP/CHI/83/017. Documento de trabajo N° 14. 24 p.

PULIDO, A. 2000. Funciones de Biomasa para individuos de regeneración vegetativa de la especie *Quillaja saponaria* Mol. Tesis de Ing. Forestal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Forestales. 63 p.

REYES M. 2006. Caracterización del desarrollo de rebrotes de diferentes edades, en un monte bajo clareado de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), en el secano interior de la VI Región. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Forestales. Departamento de Silvicultura 55 p.

RODRIGUEZ, R. MATTHEI O. y QUEZADA M. 1983. Flora arbórea de Chile. Concepción. Chile. Editorial de la Universidad de Concepción. 407 pp.

SAN MARTÍN, R. y BRIONES, R. 1999. Industrial uses and sustainable supply of *Quillaja saponaria* (Rosaceae) saponins. *Economic Botany* 53 (3): 302-311.

SATOO, T. y MAGDWICK, H.A.I. 1982. Forest biomass. *Forestry Sciences*. MartinusNijhoff / Dr W. Junk Publishers. Netherlands. 135 p.

SFEIR, J. 1990. Evaluación de la fitomasa y metabolitos de interés comercial en Boldo (*Peumus boldus* Mol.), Quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) y Eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) en la VII Región. Tesis de Ing. Forestal. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 75 p.

SNOWDON, P. RAISON, J. KEITH, H. y RITSON, P. 2002. Protocol for Sampling Tree and Stand Biomasa. Australia, Greenhouse Office, National Carbon Accounting System Technical Report No. 31. 76 pag.

TORAL, M. 1983. Estudio de la estructura, crecimiento y rendimiento en Quillay (*Quillaja saponaria* Mol). Informe Técnico Proyecto N° A 1180.8333. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. Chile. 76 p.

TORAL, M. y ROSENDE, R. 1986. Producción y productividad del quillay. Renarres 3 (8): 19 -21

VITA, A. 1974. Algunos antecedentes para la silvicultura del quillay (*Quillaja saponaria* Mol.). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Boletín Técnico N°28. 31 p.

7. APÉNDICES

Apéndice 1: Tabla de Rodal de área en estudio

Marca de clase (di)	Dat (mm)	Par2	Par3	Par4	promedio	Nha	Ht_promedio
5	0 - 10	5	3	2	3,3	33,3	456,4
15	10 - 20	4	2	0	2,0	20,0	883,3
25	20 - 30	9	2	5	5,3	53,3	1179,4
35	30 - 40	5	3	1	3,0	30,0	1605,6
45	40 - 50	9	9	8	8,7	86,7	1653,8
55	50 - 60	9	7	8	8,0	80,0	2201,7
65	60 - 70	11	16	16	14,3	143,3	2607,4
75	70 - 80	10	15	9	11,3	113,3	2999,4
85	80 - 90	20	10	11	13,7	136,7	3188,8
95	90 - 100	15	17	15	15,7	156,7	3609,4
105	100 - 110	9	16	15	13,3	133,3	4001,0
115	110 - 120	1	7	9	5,7	56,7	4127,1
125	120 - 130	3	5	4	4,0	40,0	4387,5
135	130 - 140	1	4	3	2,7	26,7	4331,3
145	140 - 150	0	0	3	1,0	10,0	3833,3
Total		111	116	109	112,0	1120,0	

Apéndice 2: Análisis de varianza para la biomasa fuste, ramas, hojas.

3.1: Biomasa de Fuste

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Pr > F
Modelo	1	227.65336	227.65336	2615.15	<.0001
Error	117	10.18506	0.08705		
Total	118	237.83842			

Raíz del ECM 0.29505
R² 0.9572
Coeficiente de Variación -24.90555

3.2: Biomasa de Ramas

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Pr > F
Modelo	1	286.22000	286.22000	555.17	<.0001
Error	117	60.31976	0.51555		
Total	118	346.53975			

Raíz del ECM 0.71802
R² 0.8259
Coeficiente de Variación -36.95733

3.3: Biomasa de Hojas

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Pr > F
Modelo	1	191.98373	191.98373	656.43	<.0001
Error	117	34.21848	0.29247		
Total	118	226.20221			

Raíz del ECM 0.54080
R² 0.8487
Coeficiente de Variación -25.23128

Apéndice 3: Modelo NSUR (Nonlinear Seemingly Unrelated Regression)

Usando los datos descritos en el cuadro 7, para un árbol de $Dat= 35$ mm y $Ht=1605$ mm. Se obtuvo valores para $\hat{Y}_{fuste} = 12.43$ kg/ha; $\hat{Y}_{ramas} = 4.78$ kg/ha; $\hat{Y}_{hojas} = 3.84$ kg/ha, entonces $\hat{Y}_{total} = 12.43 + 4.78 + 3.84 = 21.06$ kg/ha. El error medio para la predicción de los componentes es realizado con la siguiente ecuación:

$$z(b)' = \frac{\delta f(x,b)}{\delta b}$$

Para \hat{Y}_{fuste} el vector $z(b)'$ es caracterizado por: $\left[(Dat*Ht)^D a*(Dat*Ht)^D \ln(Dat*Ht) \right]$

Entonces usando los datos descritos en el cuadro 7 para la biomasa de fuste, se obtiene:

$$z(b)' = \left[1697619,466 \quad 4,533851281 \right]$$

La matriz de varianzas-covarianzas de b , para la función de regresión de biomasa de fuste es:

$$\begin{bmatrix} 7,95E-13 & -1,44E-07 \\ -1,44E-07 & 0,025951493 \end{bmatrix}$$

La matriz de varianza-covarianza esta dada por $E(\epsilon\epsilon') = Q = \Sigma \otimes I$, donde \otimes es el producto de Kronecker, la matriz Q es de tal naturaleza que el elemento que se encuentra sobre la diagonal q_{ii} es la varianza de ϵ_i , y q_{ij} es la covarianza entre ϵ_i y ϵ_j para toda $i \neq j$ y definen a σ_{ij} , por lo tanto $E(\epsilon_i \epsilon_j') = \sigma_{ij}I$. Por lo tanto la varianza para \hat{Y}_{fuste} esta dada por:

$$S_{\hat{Y}_i}^2 = z_i(b)' \hat{\Sigma}_b z_i(b)$$

Donde $z_i(b)'$ es un vector fila de las i ecuaciones de la matriz de derivadas parciales $z(b)$.

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{Y}_{fuste}) = \left[1697619,466 \quad 4,533851281 \right] \begin{bmatrix} 7,95E-13 & -1,44E-07 \\ -1,44E-07 & 0,025951493 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1697619,466 \\ 4,533851281 \end{bmatrix}$$

$$0.6079 \text{ kg}^2$$

Para los otros componentes se obtienen, $\widehat{\text{Var}}(\hat{Y}_{\text{ramas}})=7.95 \text{ kg}^2$, $\widehat{\text{Var}}(\hat{Y}_{\text{hojas}})= 0,00027928 \text{ kg}^2$. Las correlaciones entre los pesos de la biomasa de los componentes son:

$$\rho_{\hat{Y}_{\text{fuste}} \hat{Y}_{\text{ramas}}} = 0.16, \rho_{\hat{Y}_{\text{fuste}} \hat{Y}_{\text{hojas}}} = 0.01 \text{ y } \rho_{\hat{Y}_{\text{ramas}} \hat{Y}_{\text{hojas}}} = 0.52$$

Entonces usando la ecuación descrita en el capítulo 2.4

$$\begin{aligned} \widehat{\text{Var}}(\hat{Y}_{\text{total}}) &= 0,6079 + 7,95 + 0,000279282 + 2*0.16\sqrt{0,6079*7,95} + 2*0.01\sqrt{0,6079*0,000279282} + \\ &+ 2*0.52\sqrt{7,95*0,000279282} \\ &= 9.311 \text{ kg}^2 \end{aligned}$$

Entonces construyendo el intervalo de confianza al 95% de confianza, descrito en el capítulo 3.2.4 se tiene que

$$21.06 \pm 2.108 = (23,17249; 18,9554034)$$

Se determino utilizar el intervalo más conservador para estimar la aditividad de las funciones de cada componente, para así poder obtener una biomasa total mas precisa.

Apéndice 4: Densidad básica de la madera de *Quillaja saponaria*

Árbol	Probeta	Peso seco	Valor saturado	Volumen saturado	Densidad Kg / m ³	Calibración saturado
13A	R1	0,94	17,97	1,899	495,0	11,64
	R2	0,85	18,77	2,139	397,4	11,64
28B	R1	1,22	17,69	1,806	675,5	11,67
	R2	1,12	16,99	1,596	701,8	11,67
21	R1	1,26	17,35	1,698	742,0	11,69
	R2	1,22	18,59	2,07	589,4	11,69
15	R1	1,07	18,21	1,95	548,7	11,71
	R2	1,02	18,77	2,118	481,6	11,71
24	R1	1,14	17,31	1,674	681,0	11,73
	R2	1,12	18,54	2,043	548,2	11,73
28	R1	0,97	18,83	2,127	456,0	11,74
	R2	1,04	17,87	1,839	565,5	11,74
22	R1	1,13	18,06	1,914	590,4	11,68
	R2	1,00	18,90	2,166	461,7	11,68
4	R1	1,29	18,30	1,983	650,5	11,69
	R2	1,12	18,54	2,055	545,0	11,69
23B	R1	1,37	18,80	2,127	644,1	11,71
	R2	1,03	18,67	2,088	493,3	11,71
28A	R1	1,02	18,78	2,121	480,9	11,71
	R2	0,98	18,67	2,088	469,3	11,71
13A	R1	0,99	18,23	1,956	506,1	11,71
	R2	0,95	17,23	1,656	573,7	11,71
26	R1	0,97	18,79	2,145	452,2	11,64
	R2	1,01	18,56	2,076	486,5	11,64
Promedio					551,5	

Apéndice 5: Prueba de Kolmogorov-Esmirnov para los contenidos de carbono por componente

6.1: Prueba de Kolmogorov-Esmirnov para fuste (varianzas homogéneas)

Fuste					
Xi	Sn(X)	Zx(*)	Fo(x)		Sn(X)-Fo(x)
46,435	0,1	-1,35	0,0885	0,0115	0,0115
46,596	0,2	-1,23	0,1093	0,0907	0,0907
47,309	0,3	-0,67	0,2514	0,0486	0,0486
47,862	0,4	-0,24	0,4052	-0,0052	0,0052
47,931	0,5	-0,18	0,4286	0,0714	0,0714
48,040	0,6	-0,10	0,4602	0,1398	0,1398
48,431	0,7	0,21	0,5832	0,1168	0,1168
48,822	0,8	0,51	0,6950	0,105	0,1050
49,722	0,9	1,22	0,8888	0,0112	0,0112
50,494	1	1,82	0,9656	0,0344	0,0344

$t = 0.328 > 0.1398$ NRH0

6.2: Prueba de Kolmogorov-Esmirnov para ramas (varianzas homogéneas)

Ramas					
Xi	Sn(X)	Zx(*)	Fo(x)		Sn(X)-Fo(x)
46,160	0,1	-1,36	0,1271	-0,0271	0,0271
46,328	0,2	-1,21	0,1335	0,0665	0,0665
46,398	0,3	-1,14	0,1271	0,1729	0,1729
47,431	0,4	-0,19	0,4247	-0,0247	0,0247
47,637	0,5	-0,005	0,5000	0,0000	0,0000
47,961	0,6	0,29	0,6141	-0,0141	0,0141
48,045	0,7	0,37	0,6443	0,0557	0,0557
48,440	0,8	0,73	0,7673	0,0327	0,0327
48,516	0,9	0,80	0,7881	0,1119	0,1119
49,505	1	1,71	0,9564	0,0436	0,0436

$t = 0.328 > 0.1729$ NRH0

6.3: Prueba de Kolmogorov-Esmirnov para hojas (varianzas homogéneas)

Hojas					
Xi	Sn(X)	Zx(*)	Fo(x)		Sn(X)-Fo(x)
46,433	0,1	-1,14	0,1271	-0,0271	0,0271
46,747	0,2	-1,01	0,1562	0,0438	0,0438
47,585	0,3	-0,68	0,2483	0,0517	0,0517
48,072	0,4	-0,49	0,3121	0,0879	0,0879
48,365	0,5	-0,37	0,3557	0,1443	0,1443
48,723	0,6	-0,23	0,4090	0,191	0,1910
48,832	0,7	-0,19	0,4247	0,2753	0,2753
52,038	0,8	1,08	0,8599	-0,0599	0,0599
52,938	0,9	1,44	0,9251	-0,0251	0,0251
53,287	1	1,58	0,9429	0,0571	0,0571

$t = 0.328 > 0.2753$ NRH0

Apéndice 6: Tabla de ANDEVA para los contenidos de carbono por componente

Datos obtenidos con el procedimiento C/N analiser 3000

Hojas	Ramas	Fuste
53,287	46,398	47,309
52,938	47,431	46,435
52,038	46,160	46,596
48,832	47,637	49,722
48,723	48,516	48,431
46,433	46,328	47,862
48,072	47,961	50,494
48,365	48,045	48,822
47,585	48,440	47,931
46,747	49,505	48,040

Origen de las variaciones	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	2	14,4070131	7,203506558	2,3548	5,48811776
Dentro de los grupos	27	82,5948442	3,059068305		
Total	29	97,0018573			

$F <$ Valor crítico F, por lo tanto, No rechazo H_0