

O/H. 1225  
L 26

43708

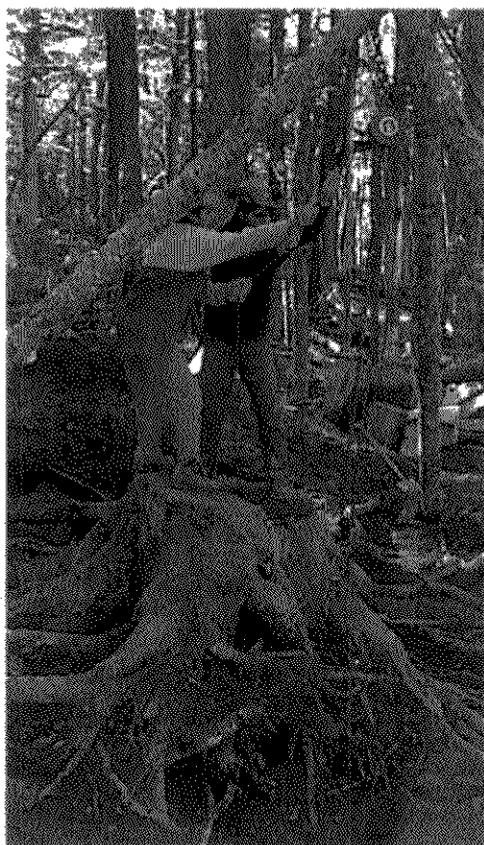
PROVINCIA DE TIERRA DEL FUEGO, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL  
ATLÁNTICO SUR

SUBSECRETARIA DE PLANEAMIENTO

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES

DIRECCION DE PROGRAMAS

**PROYECTO "EVALUACIÓN DE LOS BOSQUES DE LENGUA DE  
TIERRA DEL FUEGO COMO SUMIDEROS DE CARBONO"**



Informe Final

**Dr. Gabriel A. Loguercio**

FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO FORESTAL, AMBIENTAL Y DEL  
ECOTURISMO PATAGÓNICO

Esquel, Noviembre

2001

Subsecretario de Planeamiento de la Provincia de Tierra del Fuego

**Ing. Ftal Jorge Ontivero**

Contraparte técnico de la Provincia de Tierra del Fuego

**Ing. Ftal Ricardo Hlopec**

Supervisor del Consejo Federal de Inversiones

**Ing. Agr. Jorge Ferrer**

## **Agradecimientos**

El presente proyecto surge de una solicitud de parte de la Provincia de Tierra del Fuego al Consejo Federal de Inversiones, para que la Fundación para el Desarrollo Forestal, Ambiental y del Ecoturismo Patagónico efectúe un estudio para la elaboración de funciones de biomasa aérea y subterránea de la lenga en Tierra del Fuego, para ser utilizadas en evaluaciones de carbono en los bosques de esta especie.

En mi carácter de responsable técnico del proyecto quiero agradecer al Ing. Forestal Jorge Ontivero, Subsecretario de Planeamiento de la Provincia de Tierra del Fuego y al Ing. Ftal Ricardo Hlopec, de la misma dependencia, por la propuesta para que realizara este trabajo, así como la colaboración recibida en la información y apoyo logístico durante todo el trabajo de campo. Al mismo tiempo quiero agradecer a los Ing. Ftales. Nestor Urquía y Luis Colombo y al Sr. Vargas de la Dirección de Bosques de la provincia, por la ayuda para la preseleccionar los lugares de muestreo. Agradezco al Ing. Ftal. Leonardo Collado de la misma Dirección por haberme facilitado los mapas e información del Inventario Forestal Provincial. Al Ing. Ftal. Fabián Boyeras, representante técnico de la empresa del Sr. Bronzovic, quiero expresarle mis gracias por habernos facilitado el apoyo logístico para la toma de muestras bajo su concesión en el Lote 91.

Otras personas que colaboraron con información fueron el Ing. Pablo Yapura quien me brindó datos de las parcelas de muestreo que estaba relevando para el estudio de Evaluación de los Cuarteles intervenidos, y al Ing. Enrique Wabo, quien me facilitó la función de altura del Inventario Forestal

Provincial, que no estaba publicada en el informe del mismo. Por último agradezco al Ing. Jorge Ferrer del Consejo Federal de Inversiones, quien, como Supervisor, supo darme las recomendaciones administrativas pertinentes a lo largo del proyecto.

Del equipo de campo quiero mencionar a la Lic. en Biología Ivonne Orellana, a los Técnicos Ftales. Pedro Rojas Arellano, Adriano Arach y Juan Carlos Salazar, a los Sres. Mariano Gómez y Francisco A. Oliva, quienes, con un gran esfuerzo físico, fueron los "motores" que permitieron alcanzar los objetivos del muestreo destructivo. El Ing. Ftal Horacio Claverie colaboró asesorándome en materia informática para el procesamiento de las imágenes digitales. A él le expreso mis gracias. Ivonne Orellana y Mariano Gómez participaron también activamente en el procesamiento de la determinación de los volúmenes de los componentes de la madera y de sus densidades básicas.

Por último quiero expresar mi gran satisfacción porque mediante la realización del presente estudio, he podido conocer y quedar maravillado por los imponentes bosques de lenga de la provincia de Tierra del Fuego.

## **INDICE**

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>6</b>
3.1 ELECCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO.....	6
3.2 ELECCIÓN DE LOS ÁRBOLES MUESTRA .....	7
3.3 MEDICIONES DE LOS ÁRBOLES EN PIE .....	8
3.4 DETERMINACIÓN DE BIOMASA MEDIANTE EL MÉTODO DE MUESTREO DESTRUCTIVO	8
<b>3.4.1 Biomasa aérea .....</b>	<b>9</b>
<b>Distribución de biomasa en los componentes de la madera del fuste e</b>	
<b>incidencia de las pudriciones.....</b>	<b>11</b>
<b><i>Volumen de cada componente</i>.....</b>	<b>12</b>
<b><i>Densidad</i> .....</b>	<b>15</b>
<b>3.4.2 Biomasa subterránea .....</b>	<b>15</b>
3.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN .....	17
3.6 COEFICIENTES DE REDUCCIÓN Y EXPANSIÓN DE BIOMASA.....	18
3.7 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO .....	19
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
4.1 BASE DE DATOS PARA LA CONFECCIÓN DE LAS FUNCIONES DE BIOMASA.....	20
<b>4.1.1 Características dimensionales de los árboles muestra .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.2 Contenidos de humedad de las muestras .....</b>	<b>23</b>

4.1.3 Distribución de biomasa en los árboles muestra .....	24
4.2 ANÁLISIS DE REGRESIÓN .....	27
4.2.1 Selección de los modelos .....	27
4.2.2 Biomasa aérea .....	28
4.2.3 Biomasa radical .....	31
4.2.4 Biomasa de las pudriciones .....	31
4.2.4.1 Volumen de los componentes .....	32
4.2.4.2 Densidades .....	33
4.2.4.3 Perdidas de biomasa .....	34
4.3 CONTENIDO DE CARBONO DE LOS COMPONENTES DE LA MADERA .....	35
4.4 FACTORES DE EXPANSIÓN Y REDUCCIÓN .....	36
<b>5. DISCUSION Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
5.1 DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA EN LOS ÁRBOLES MUESTRA .....	37
5.2 FUNCIONES DE BIOMASA .....	39
5.3 VOLUMEN Y DENSIDAD DE LOS COMPONENTES DEL FUSTE .....	40
5.4 PÉRDIDAS DE BIOMASA POR LAS PUDRICIONES .....	41
5.5 FACTORES DE EXPANSIÓN Y REDUCCIÓN .....	42
5.6 CONTENIDO DE CARBONO .....	42
5.7 ALGUNAS CONSIDERACIONES FINALES .....	43
<b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUCCION

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) reconoció en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro de 1992, que el aumento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) es la principal causante del Cambio Climático Global. El GEI más importante es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ya que interviene en más del 55 % de las emisiones totales.

El Protocolo de Kioto, negociado durante COP-3 en 1997, contempla *Mecanismos de Flexibilización* para que los países industrializados puedan compensar parte de sus compromisos de reducción de emisiones mediante proyectos, en terceros países, que contribuyan a la mitigación del Cambio Climático. El *Mecanismo de Desarrollo Limpio* es el marco que habilitará la realización de proyectos entre países industrializados y países en vías de desarrollo, como Argentina.

Los bosques, a través de la fotosíntesis tienen capacidad de absorber CO<sub>2</sub> del aire y fijarlo en su biomasa y en el suelo, jugando un rol preponderante en el ciclo global del carbono. En el Sector de Usos del Suelo, Cambios de Usos del Suelo y las Actividades Forestales que considera la Convención de Cambio Climático, hay tres posibilidades de contribución a la mitigación del Cambio Climático, alternativas cuya utilización vienen siendo discutidas desde hace varios años en el seno de la Convención. Estas son la **reducción de emisiones**, como conservación de bosques y manejo forestal sustentable, la **absorción de carbono** a través de forestación y reforestación y la **sustitución de productos por otros de madera**, para cuya elaboración se requiere de menor cantidad de

energía fósil, además del uso de la madera como fuente de energía y biocombustible.

En la reciente Reunión de las Partes (mayo 2001) realizada en la ciudad de Bonn (Alemania), conocida como COP6-bis-, se acordó que para el primer período de compromiso establecido por el Protocolo de Kioto (2008-2012), las actividades forestales que podrán ser utilizadas en los Mecanismos de Desarrollo Limpio serán la *Forestación y Reforestación*, excluyendo la Conservación de bosques (que evitaría la *Deforestación*). Esta definición no significa, sin embargo, que esta última opción no pueda ser incorporada en el próximo período de compromiso, según la experiencia que se recoja durante el primer período y la marcha de las negociaciones.

Los bosques de lenga son los más importantes dentro de los bosques andino-patagónicos argentinos, particularmente en la Provincia de Tierra del Fuego, tanto por la superficie que ocupan (alrededor de 400.000 ha), como por su valor económico (Bava, 1997). Sus altos volúmenes de madera tanto en pie como caída y de materia orgánica en el suelo, representan grandes cantidades de carbono acumulado. Sin embargo, el servicio ambiental que pueden prestar estos bosques para la mitigación del incremento del efecto invernadero no ha sido aún cuantificado.

Recientemente se acaba de completar el Inventario Forestal de Tierra del Fuego y se está realizando otro estudio para evaluar el estado actual de los bosques aprovechados. Ambos son una base muy importante para comenzar a analizar el potencial de los lengales de Tierra del Fuego como almacenadores de carbono. Existen además en la provincia varios estudios de relevancia sobre la dinámica natural de los bosques de lenga vírgenes y tratamientos silviculturales

alternativos para su manejo (Mutarelli & Orfila 1969a, 1969b y 1973, Bava 1997); y dos investigaciones en las que se determinó la biomasa (Richter & Frangi 1992) y el carbono acumulado (Weber 1999) en el bosque virgen de la especie.

En el marco de los proyectos forestales de mitigación del Cambio Climático, es necesario determinar los cambios de stock de carbono, como diferencia entre la cantidad almacenada en el sistema bajo el uso tradicional (*línea base*) y bajo la implementación del proyecto. Como primer paso para poder realizar cuantificaciones de carbono en distintas estructuras y estados del bosque, así como para el monitoreo de los cambios producidos por el uso, es necesario contar con herramientas que, en forma simple y precisa, permitan estimar el carbono acumulado en la biomasa de los árboles.

Para este fin son recomendables ecuaciones alométricas que sirven para estimar la biomasa total de los árboles y su distribución a partir de variables de fácil medición y bajo costo. Estas, elaboradas con una sólida base de datos, tomada sobre una amplia variedad de calidades de sitios y edades, se presentan como el instrumento para realizar estimaciones de carbono a distintas escalas (proyecto, región, provincia, etc.), tanto a partir de datos disponibles de inventarios previos, como mediante nuevos relevamientos.

La lenga representa un caso particular para las estimaciones de biomasa, debido a que una parte importante de su volumen está afectado por pudriciones que degradan la madera (sobre todo en árboles maduros y sobremaduros). Las pérdidas de masa por descomposición representan emisión de carbono almacenado. Por ello es oportuno, además, contar con ecuaciones que permitan estimar estas pérdidas de biomasa en árboles de distintos tamaños.

## **2. OBJETIVOS**

Los objetivos de este proyecto fueron:

-Desarrollar ecuaciones alométricas de biomasa para cuantificar el carbono acumulado en cada compartimiento aéreo (fuste, ramas y hojas), así como las pérdidas ocasionadas por las pudriciones blanca y castaña.

-Desarrollar ecuaciones alométricas de biomasa para cuantificar el carbono acumulado en las raíces.

## **3. MATERIALES Y METODOS**

### **3.1 Elección de las áreas de estudio**

La selección de las áreas de muestreo abarcaron una amplia variedad de calidades de sitio, que representan razonablemente a los bosques productivos de lenga en la provincia de Tierra del Fuego. En base a la información dasométrica disponible de inventarios forestales previos, se estableció que dichas calidades, expresada a través de la altura media de los árboles dominantes, comprenden un rango entre 15 y 30 m.

Una restricción para la selección de los sitios de muestreo en estudios de biomasa es la logística debido al traslado de instrumental y muestras de madera de mucho peso. Por ello las áreas deberían ser relativamente accesibles para llegar con vehículos. La zona elegida, en la cual se cumplen las condiciones anteriores y existe abundante información previa, se ubica en los alrededores de la localidad de Tolhuin, en la margen Este del Lago Fagnano (ver anexo, mapa 1).

### 3.2 Elección de los árboles muestra

En base a la información existente de inventarios previos se eligieron los rodales, donde se apearon los árboles muestra. La elección específica de cada árbol se realizó en base a parcelas permanentes existentes y a parcelas temporales.

- Parcelas permanentes: en el estudio "Evaluación del Estado de los Cuarteles Forestales Aprovechados y sus Areas de Influencia" (Yapura 2000), se instaló una red de parcelas permanentes para el inventario forestal continuo. De éstas se eligieron algunas, según el acceso, sitio y estructura, en las que se seleccionaron al azar dos a tres árboles en cada una para su apeo.

- Parcelas temporales: en otros Cuarteles en los que se habían realizado inventarios previos, pero que no contaban con parcelas permanentes, se ubicaron calidades de sitio que aún no estaban representadas en muestras anteriores y se midieron parcelas temporales de superficie variable. A partir de un punto tomado al azar dentro del rodal, se realizó un recuento angular con el dendrómetro de Krammer, dejando identificado cada árbol contado, para luego elegir al azar dos o tres por parcela.

El total de árboles muestra fue 50 para la parte aérea y 29 para la parte subterránea. En la tabla 1 se listan los Cuarteles Forestales muestreados y en los mapas 1 y 2 del Anexo se los ubica geográficamente.

**Tabla 1:** Distribución de los árboles muestra de la biomasa aérea y subterránea en los Cuarteles del bosque virgen y aprovechado.

Cuartel	Estado del Rodal	Número de árboles muestra	
		Aérea	Subterránea
Río Valdez -Laguna Krren-	Virgen	7	5
Río Valdéz -Arroyo Café-	Virgen	6	4
Río Valdéz-	Virgen	5	3
-Arroyo Milna-	Aprovechado	2	1
Cerro Michi	Virgen	6	5
	Aprovechado	6	5
Aguas Blancas	Aprovechado	4	2
Lote 93	Virgen	1	1
	Aprovechado	2	3
Río Valdez	Virgen	4	-
-Ea. Valdéz-	Aprovechado	7	-
<b>Total</b>		<b>50</b>	<b>29</b>

### 3.3 Mediciones de los árboles en pie

En los árboles en pie, antes de ser volteados, se realizaron los siguientes registros:

- Posición sociológica
- DAP (cm)
- Altura del inicio de copa (m): corresponde al largo del fuste hasta la primer rama a partir de la cual la copa presenta continuidad vertical
- Altura total (m)

### 3.4 Determinación de biomasa mediante el método de muestreo destructivo

La biomasa de cada árbol se dividió en la correspondiente a la parte aérea

y la de la parte subterránea. Para su determinación se utilizó el método destructivo y posterior pesada de cada compartimiento con balanza *Pesola* de 100 kg. Los árboles fueron apeados a una altura de 0,3 m desde su base, separando así la parte aérea de la subterránea.

### **3.4.1 Biomasa aérea**

La parte aérea se divide en el fuste, que va desde la altura de corte sobre el tocón hasta la altura en que el diámetro del fuste es de 10 cm y la copa, formada por ramas con diámetro < 10 cm, más las hojas. Sobre el árbol apeado se corroboraron las alturas. El fuste fue trozado en largos variables entre 1 y 2 metros, según sus dimensiones y el grado de afectación por pudriciones. En este estudio cada troza del fuste fue seccionada en unidades de hasta 100 kg, por ser el máximo peso admisible por la balanza utilizada. Para facilitar la operación de pesadas, la balanza fue colgada de un trípode confeccionado en el terreno con varas de lenga (ver figura 1). De cada cara de las trozas se tomaron probetas para determinar en laboratorio su contenido de humedad, luego de ser secadas en estufa a 75 °C, hasta peso constante.



**Figura 1:** Pesada de sección del fuste con Pesola.

Las ramas de las copas con diámetro  $< 10$  cm se separaron de las hojas en forma manual (estas últimas incluían una pequeña porción de rama de menor orden con diámetro  $< 1$  cm) y se acondicionaron en lonas para luego ser pesadas (ver figura 2). De las ramas y las hojas de cada copa se tomaron alícuotas (con tres repeticiones), para determinar en laboratorio sus contenidos de humedad, luego de ser secadas en estufa a  $75$  °C hasta peso constante. Conocida la relación peso húmedo/peso seco se determinó el peso seco total del árbol.



**Figura 2:** Acondicionamiento de ramas y hojas separadas para su pesado.

### **Distribución de biomasa en los componentes de la madera del fuste e incidencia de las pudriciones.**

Es conocido que la lenga, debido a la longevidad de los árboles que forman el bosque natural, está afectada por complejos de hongos que producen pudriciones de la madera, vulgarmente denominadas pudriciones del tipo castaña y blanca. Los principales agentes de la pudrición castaña son *Postia peliculosa* y *Piptosporos potentosus* (Cwielong & Rajchenberg, 1995), mientras que la pudrición blanca es ocasionada sobre todo por *Phellinus andinopatagonicus* (Cwielong & Rajchenberg, inédito). Estos hongos consumen la celulosa y la lignina, reduciendo la densidad de la madera, pérdida que representa CO<sub>2</sub> emitido

y por ello es importante estimar.

No existen muchos estudios que cuantifiquen la biomasa o el volumen de pudriciones en árboles en pie. En un estudio realizado en un bosque de lenga en la provincia del Chubut, se ajustó un método para estimar la participación de las pudriciones de la biomasa del fuste en base a la determinación del volumen y la densidad de cada componente (Loguercio *et al.* 2001). En el presente trabajo se utilizó esa metodología, considerando que el fuste presenta los siguientes componentes y estados sanitarios:

*-corteza*

*-albura sana*

*-duramen sano*

*-duramen con pudrición castaña*

*-duramen con pudrición blanca*

### ***Volumen de cada componente***

Los volúmenes se obtuvieron en base a un procedimiento computacional. Este consiste en la determinación digital de las superficies de cada componente y sus estados sanitarios, para luego calcular sus volúmenes mediante la fórmula de *Smalian*.



**Figura 3:** Calcado de las superficies de las caras de las trozas.

En terreno se calcularon las áreas que cada uno de los componentes ocupaban sobre las caras de las trozas (ver figura 3). Esto se realizó con marcador negro indeleble sobre polietileno transparente de 100  $\mu\text{m}$ .

En gabinete, los calcos fueron transformados en imágenes digitales, a través de dos vías, según el tamaño de los calcos a procesar. Cuando el diámetro de la troza era menor a 25 cm, se digitalizaron mediante un scanner de mesa, cuando el diámetro era mayor a 25 cm se tomaron fotos con una máquina digital a distancias fijas (registrando la escala).

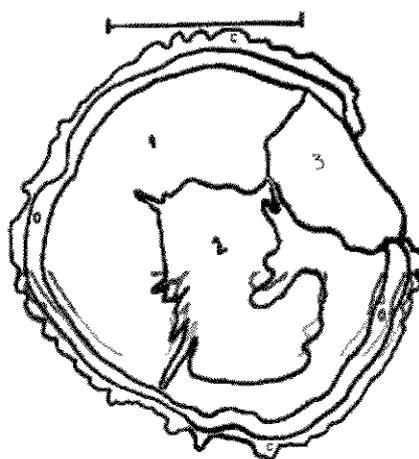
Luego mediante el programa *Corel OCR-Trace 8*, las imágenes fueron transformadas de raster a vectorial, para determinar entonces las superficies de los componentes mediante el programa de visualización *Arc View 3.1*. La figura 4 muestra la imagen de una torta con pudrición castaña y blanca, su calco digitalizado y la imagen final de las que se obtuvieron las superficies de los componentes.

La biomasa de cada componente se calculó como el volumen por su

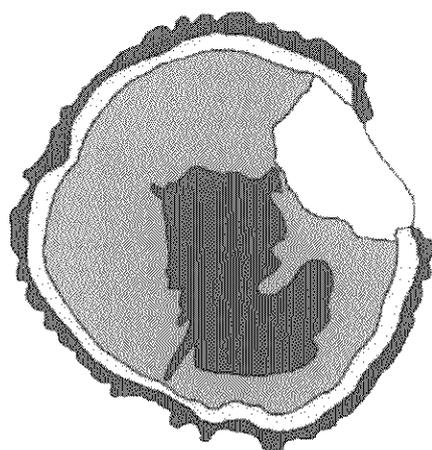
densidad. Entonces la biomasa total del fuste se obtuvo por la siguiente fórmula:

$$B_{fr} = Volc * \delta_c + Vola * \delta_a + Volds * \delta_{ds} + Volpc * \delta_{pc} + Volpb * \delta_{pb}$$

donde:  $B_{fr}$  = Biomasa del fuste y las ramas principales (>10 cm);  $Volc$  = volumen de la corteza;  $\delta_c$  = densidad de la corteza;  $Vola$  = volumen de albura;  $\delta_a$  = densidad de albura;  $Volds$  = volumen de duramen sano;  $\delta_{ds}$  = densidad de duramen sano;  $Volpc$  = volumen de madera con pudrición castaña;  $\delta_{pc}$  = densidad de madera con pudrición castaña;  $Volpb$  = volumen de madera con pudrición blanca;  $\delta_{pb}$  = densidad de madera con pudrición blanca



C = Corteza  
0 = Albura  
1 = Duramen sano  
2 = Pudrición castaña  
3 = Pudrición blanca



albura sana  
corteza  
duramen sano  
p. blanca  
p. castaña

**Figura 4:** Foto de cara de una torca (arriba izquierda), calco digitalizado de cada componente de la madera (arriba derecha) e imagen procesada (abajo).

## **Densidad**

Las densidades se determinaron en probetas tomadas de cada una de las caras de las trozas. El tipo de densidad estudiado es la *densidad básica* (peso seco/volumen saturado). El volumen de cada probeta se obtuvo por el método de *desplazamiento de agua*, luego de mantenerlas sumergidas en agua hasta que alcanzaron su máxima expansión. Por otro lado, el peso seco se determinó luego de secar las probetas en estufa a 105 °C hasta que alcanzaron peso constante.

### **3.4.2 Biomasa subterránea**

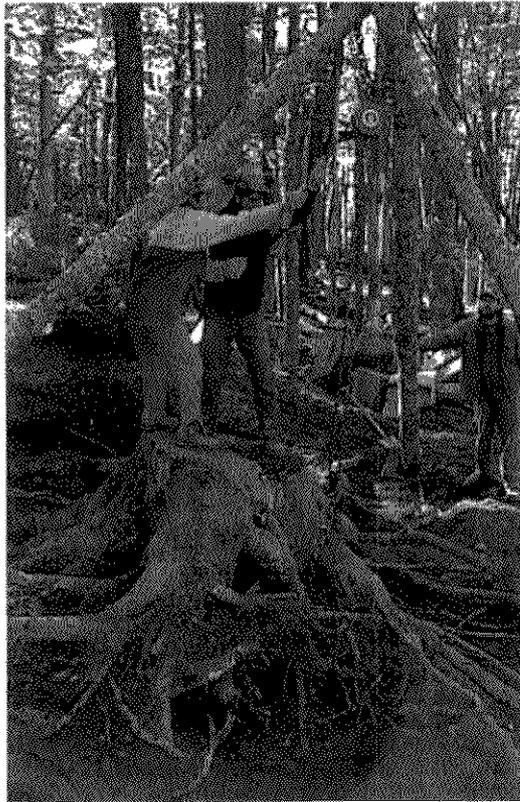
Para la determinación de la biomasa radical se siguió el método descrito en el "Manual de procedimientos para muestreos de biomasa" aplicado por el *Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial de carbono* (Universidad Austral del Chile, 2000). Este es una adaptación del método tradicional de excavación o método *Skeleton* (Böhm, 1979). Consiste en que luego de volteado el árbol, con el tocón claramente identificado, se despeja a su alrededor una zona del suelo superficial hasta donde se extienden las raíces superficiales más finas, denominada Zona de Influencia de las Raíces (ZIR).

Con ello se tiene una impresión de la distribución y el volumen de suelo a remover para liberar al sistema de raíces finas, medias y gruesas. En sentido vertical, sobre la ZIR, se excava y extrae el suelo, en lo que se denomina la Zona de Remoción del Suelo (ZRS) (figura 5).



**Figura 5:** Trabajo de excavación en la zona de remoción del suelo (ZRS)

Comenzando desde el tocón, se extrae la tierra alrededor de la raíz central, alejándose de la misma hacia el perímetro de la ZIR, para despejar las raíces superficiales, oblicuas y verticales, con el propósito primario de liberar las raíces más gruesas, que son las que más afirman el sistema completo al suelo. Una vez despejadas algunas de estas, se procede a su liberación mediante un *aparejo* capaz de levantar hasta 3 toneladas, colgado de un trípode de madera elaborado en terreno con varas de lenga con dimensiones adaptadas al tamaño de las raíces a extraer (ver figura 6). Cuidadosamente se levantan las estructuras radicales, mientras se sigue extrayendo la tierra adherida a las raíces, y profundizando la excavación.



**Figura 6:** Liberación de raíces principales con aparejo de 3 toneladas.

Las clases de raíces definidas según sus diámetros son:  $> 10$  cm, 10-5 cm, 5-2 cm y 2-0,5 cm. Para determinar su contenido de humedad se tomaron alícuotas y se secaron en estufa a  $75$  °C hasta peso constante.

### **3.5 Análisis de regresión**

Se evaluaron una serie de funciones de las más mencionadas en la literatura en estudios de biomasa (Tabla 2) para cada uno de los componentes: fuste, ramas, hojas, raíz y también se analizaron funciones para la biomasa aérea total, como suma de los componentes aéreos de los árboles muestra. Estas funciones son del tipo lineal y no lineal, utilizando como variables independientes el DAP y la altura en sus formas simples, transformadas y combinadas.

**Tabla 2:** Modelos de biomasa utilizados para el análisis de regresión

<b>Función</b>	<b>Cita</b>
$Biomasa=b_0+b_1 \cdot DAP^2$	Teller (1998)
$Biomasa=b_0+b_1 \cdot DAP^2 \cdot H$	Clutter (1988)
$Biomasa=b_0+b_1 \cdot DAP+b_2 \cdot H$	Elliot & Clinton (1993)
$Biomasa=b_0+b_1 \cdot DAP^2+b_2 \cdot H$	Elliot & Clinton (1993)
$Biomasa=b_0+b_1 \cdot DAP^{b_2} \cdot H^{b_3}$	Clutter (1988)
$Biomasa=b_0 \cdot DAP^{b_1} \cdot H^{b_2}$	Schmitt & Grigal (1981)
$Biomasa=b_0 \cdot DAP^b$	Schmitt & Grigal (1981)

Para el análisis de regresión se determinaron los coeficientes por los métodos lineales y no-lineales, mientras que la selección de los modelos se hizo en base al Índice de Furnival (Parresol, 1999). Debido a que la relación de las variables independientes utilizadas presenta heterocedasticidad con las variables independientes (sobre todo respecto al DAP), las funciones fueron ponderadas mediante  $1/DAP$ ,  $1/DAP^2$ ,  $1/DAP^3$ ,  $1/DAP^4$ ,  $1/DAP^5$ ,  $1/DAP^2 \cdot H$  y  $1/(DAP^2 \cdot H)^2$ .

Luego, como expresión de la bondad del ajuste se determinó el  $r^2$ . Además se analizaron los residuales originales y con ponderación.

### **3.6 Coeficientes de reducción y expansión de biomasa**

A fin de considerar la incidencia de las pudriciones sobre la biomasa del fuste es necesario presentar algunas definiciones utilizadas en el presente estudio.

La *biomasa neta del fuste* ( $B_{nf}$ ) se diferencia de la *biomasa bruta del fuste* y ( $B_{bf}$ ), siendo esta última la teórica que alcanzaría el fuste (o el árbol) si el volumen

de la madera afectada por las pudriciones tuviese la misma densidad de la madera sana (Loguercio *et al.*, 2001).

La determinación de la  $B_{bf}$  a partir de datos de inventarios forestales se obtiene multiplicando el volumen estimado por la densidad media de la madera sana. Para estimar la  $B_{nf}$  a partir de la  $B_{bf}$  es necesario realizar una reducción por las pérdidas producidas por las pudriciones. A esta relación se le da el nombre de *Factor de Reducción* ( $F_r$ ) (Loguercio *et al.* 2001) y se obtiene mediante:

$$F_r = B_{nf} / B_{bf}$$

Por otra parte, para estimar la *biomasa total del árbol* (fuste+copa+raíces) a partir de datos de inventarios forestales, debe conocerse la relación entre la  $B_{nf}$  y la biomasa total (suma de la *biomasa de la copa* ( $B_c$ ) (ramas secundarias con diámetro <10 cm + hojas) más la *biomasa de las raíces* ( $B_{sub}$ ) más la  $B_{nf}$ ). Esta relación se expresa mediante el *Factor de expansión* ( $F_{exp}$ ). La fórmula es:

$$F_{exp} = (B_{nf} + B_c + B_{sub}) / B_{nf}$$

### 3.7 Determinación del contenido de carbono

Para la determinación del contenido de carbono en cada uno de los componentes de la madera se utilizó el *método colorimétrico*, el cual se basa en la oxidación mediante una solución de dicromato de potasio en medio sulfúrico. Según la cantidad de reactivo utilizado en la reacción, se calcula la equivalencia de carbono presente en la muestra. La determinación se realiza

colorimétricamente midiendo la intensidad del color producido por los iones de cromo. Los análisis químicos, aplicando este método, fueron realizados en el Laboratorio de Nutrición y Suelos Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Base de datos para la confección de las funciones de biomasa**

#### **4.1.1 Características dimensionales de los árboles muestra**

La Tabla 3 presenta la distribución diamétrica de los árboles muestra para la determinación de la biomasa aérea y subterránea.

En la Tabla 4 se compara la distribución de las frecuencias diamétricas promedios de los bosques de la provincia de Tierra del Fuego, obtenidos del Inventario Forestal Provincial (Wabo, 1998), con la de los árboles muestra de este estudio (comenzando con el diámetros mínimo de 12,5 cm). Se observa que las clases diamétricas superiores en nuestro estudio están sobrerrepresentadas (en número de árboles), siendo más parecidas cuando se comparan en relación al área basal. Este sobrepeso de las clases diamétricas superiores es favorable, ya que permite absorber la mayor variación natural de biomasa de los árboles que más inciden sobre la biomasa de los rodales.

**Tabla 3:** Distribución diamétrica de árboles muestra para la determinación de la biomasa aérea y subterránea.

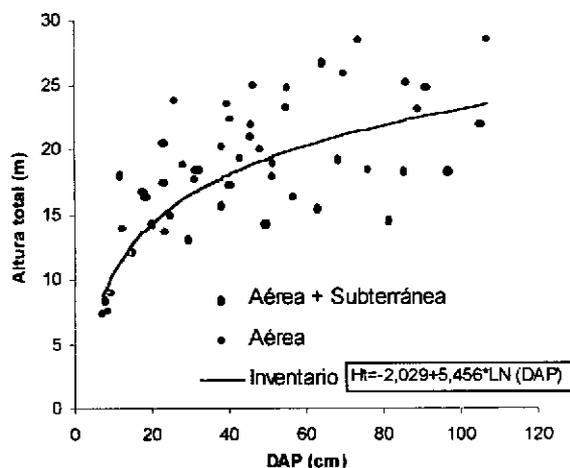
DAP (cm)	Muestras aéreas		Muestras subterráneas	
	número	%	número	%
5-15	6	12	4	14
15-25	8	16	5	17
25-35	6	12	4	14
35-45	6	12	3	10
45-55	7	14	4	14
55-65	5	10	2	7
65-75	3	6	2	7
75-85	2	4	2	7
85-95	4	8	2	7
95-105	1	2	1	3
105-115	2	4	-	-
<i>Total</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>29</i>	<i>100</i>

Los árboles muestra fueron obtenidos de rodales sobre diferentes calidades de sitio y corresponden, además, a distintas posiciones sociológicas. Por ello presentan una amplia dispersión en la relación Altura-DAP, como se observa en la Figura 7. Es de destacar la buena correspondencia en la tendencia con la función de altura del Inventario Forestal Provincial, el cual corresponde al conjunto de parcelas de muestreo que abarcaron toda la superficie de bosques de lenga de la provincia, excluyendo Parques Nacionales (Wabo, 1998).

**Tabla 4:** Comparación de la distribución de frecuencias diamétricas relativas de los bosques de lenga de toda la provincia con la de los árboles muestra.

Clase de DAP (cm)	Parámetros dasométricos de los bosques productivos				Muestra Aérea (*)		Muestra subterránea (*)	
	N/ha	%	m <sup>2</sup> /ha	%	n	%	n	%
15	82	16,1	1,45	2,8	1	2,3	1	4,0
20	80	15,7	2,51	4,8	3	6,8	1	4,0
25	71	13,9	3,49	6,6	5	11,4	3	12,0
30	63	12,3	4,43	8,4	4	9,1	3	12,0
35	56	11	5,38	10,2	1	2,3	1	4,0
40	45	8,9	5,71	10,8	5	11,4	3	12,0
45	32	6,2	5,03	9,6	4	9,1	2	8,0
50	24	4,7	4,73	9,0	4	9,1	2	8,0
55	15	3	3,61	6,9	3	6,8	1	4,0
60	13	2,6	3,76	7,1	-	-	-	-
65	8	1,6	2,65	5,0	2	4,5	1	4,0
70	7	1,3	2,5	4,8	2	4,5	1	4,0
75	6	1,1	2,56	4,9	2	4,5	1	4,0
80	2	0,4	1,06	2,0	1	2,3	2	8,0
85	2	0,5	1,36	2,6	2	4,5	1	4,0
90	2	0,4	1,27	2,4	2	4,5	1	4,0
95	1	0,1	0,43	0,8	1	2,3	1	4,0
100	1	0,2	0,63	1,2	2	4,5	0	0
<b>Suma</b>	<b>510</b>	<b>100</b>	<b>52,6</b>	<b>99,9</b>	<b>44</b>	<b>100</b>	<b>25</b>	<b>100</b>

Aclaraciones: (\*) no incluye los árboles muestra entre 5 y 15 cm de DAP



**Figura 7:** Relación altura-DAP de los árboles muestra para determinación de la biomasa aérea y de la biomasa aérea + subterránea y curva de altura del Inventario Forestal Provincial (Wabo 1998).

#### 4.1.2 Contenidos de humedad de las muestras

La Tabla 5 presenta los contenidos promedios de humedad presentes en cada compartimiento. En el caso del fuste, los valores están ponderados por las dimensiones de las trozas de las que provenían las probetas, mientras que los valores de los demás compartimientos corresponden a los promedios de las muestras. Para las raíces con diámetro mayor a 10 cm, se utilizaron los valores correspondientes al tamaño de 5-10 cm de diámetro.

Los contenidos promedios de humedad varían entre 69 y 132 %, aumentando desde el fuste a las hojas, mientras que las raíces tienen valores intermedios.

A lo largo del fuste, entre corte y corte, se observó una variación gradual del contenido de humedad (en ningún caso abrupta), que probablemente esté asociada a la irregular presencia de las pudriciones.

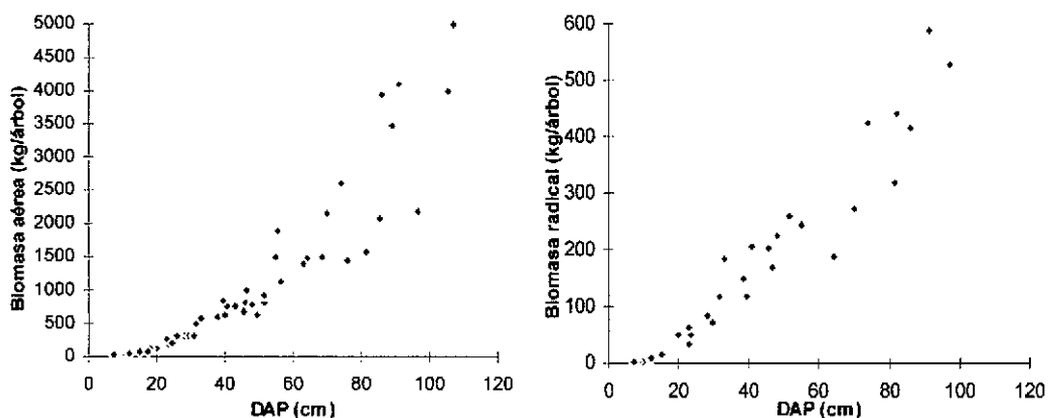
**Tabla 5:** Contenidos de humedad (base peso húmedo) promedio de los compartimientos de los árboles muestra (en porcentaje)

Parámetros	Fuste	Ramas	Hojas	Raíces		
				0,5-2 cm	2-5 cm	5-10 cm
N	50	50	50	29	29	29
Humedad $\bar{x}$ (%)	68,95	116,17	131,91	92,75	86,60	79,08
CV (%)	19,97	18,05	14,53	8,35	21,49	30,01

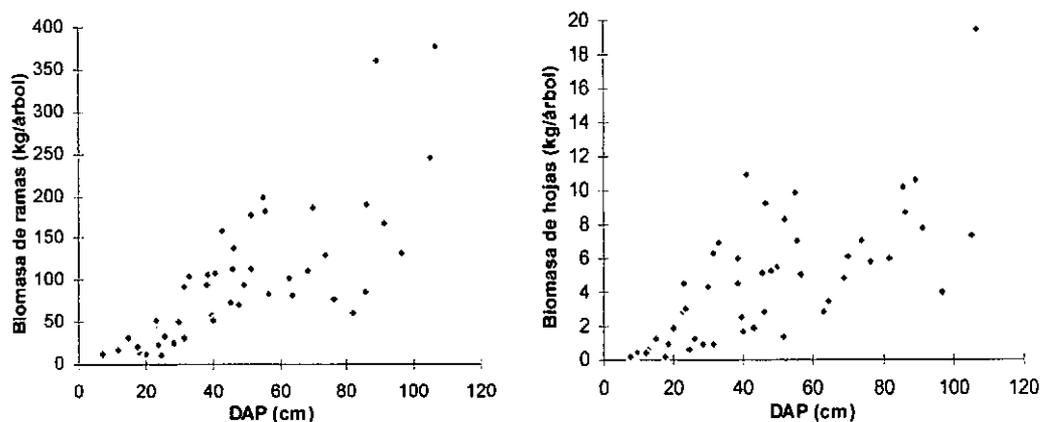
Aclaraciones: n= número de árboles muestra

#### 4.1.3 Distribución de biomasa en los árboles muestra

En las figuras 8 y 9 se observan los aumentos de la varianza de los valores de biomasa respecto al DAP, comprobándose la heterocedasticidad antes mencionada.



**Figura 8:** Relaciones entre la biomasa aérea (izq.) y subterránea (der.) y el DAP de los árboles muestra.



**Figura 9:** Relaciones entre la biomasa de las ramas (izq.) y de las hojas (der.) con el DAP de los árboles muestra.

Las proporciones de biomasa en los distintos compartimientos y su variación con el tamaño de los árboles se presenta en la figura 10. Los compartimientos que presentan mayor variación, en la medida que aumenta el tamaño de los árboles, son el fuste y las ramas. En los árboles de menor DAP, la biomasa de las ramas es mayor que la del fuste. A partir de 15 a 20 cm de DAP, la biomasa del fuste se incrementa en forma marcada, superando el 80 % del total, mientras la biomasa relativa de las ramas se reduce paulatinamente.

El fuste participa en promedio en un 63 % de la biomasa total, frente a la raíz que lo hace en un 18 %. Las hojas participan en una mínima proporción (en promedio 0,8 %), siendo mayor en los diámetros inferiores.

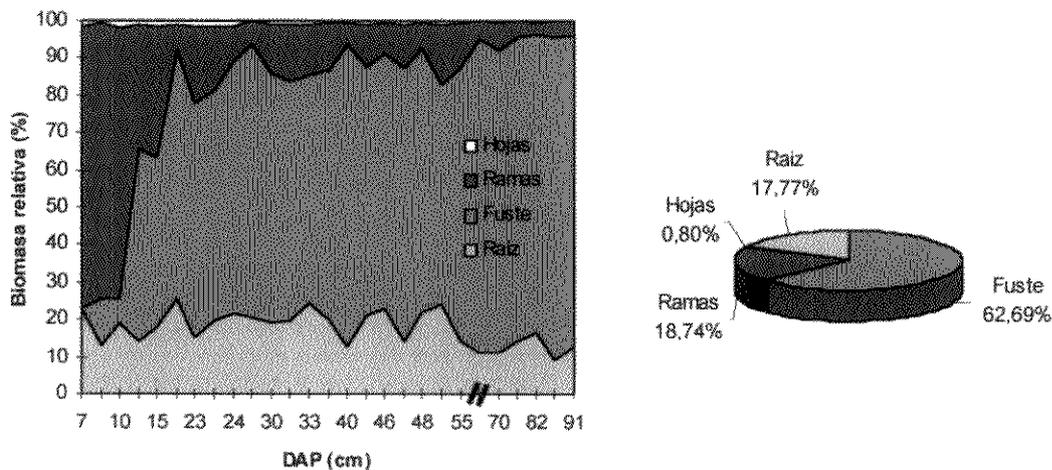


Figura 10: Distribución relativa de biomasa total en los compartimentos de los árboles muestra en relación al DAP (izq.) y a la biomasa total (der.).

La figura 11 permite identificar que la biomasa de las raíces tiende a reducir su participación relativa en la biomasa total y en proporción de la biomasa aérea en la medida que aumenta el DAP. En promedio, la relación biomasa radical/aérea (*root:shoot ratio*) es 0,22.

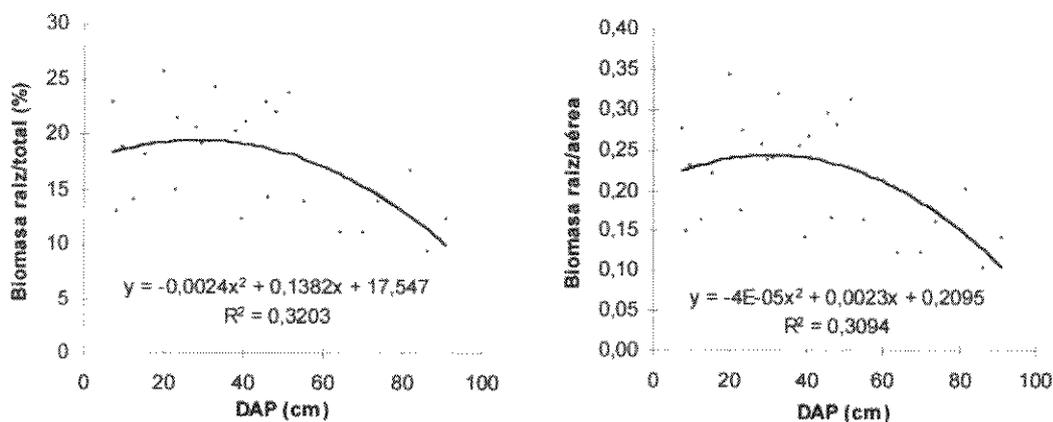
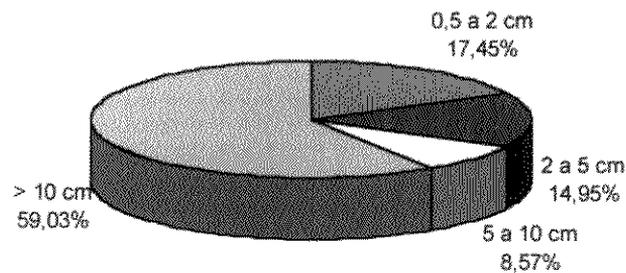


Figura 11: Participación de la biomasa radical en la biomasa total (izq.) y la relación biomasa raíz/aérea (der.) en función del DAP.

De la biomasa radical, la mayor proporción corresponde a las raíces más gruesas (>10 cm), con un 59 %, mientras que la porción más fina de las raíces gruesas (0,5-2 cm) representa el 17 % (Figura 12) .



**Figura 12:** Distribución de la biomasa subterránea según el tamaño de las raíces.

## 4.2 Análisis de regresión

### 4.2.1 Selección de los modelos

De la porción aérea se evaluaron funciones para cada compartimento por separado: biomasa del fuste, de las ramas y de las hojas, y también la suma de estos, como biomasa aérea total. Para la parte subterránea, se analizaron los modelos sin considerar clases de tamaño de las raíces -considerando que en este estudio solo se determinó la biomasa de las raíces gruesas -diámetros > 0,5 cm-.

En la Tabla 6 se presentan los valores de los Índices de Furnival más bajos de cada modelo ponderado (y el respectivo ponderador). Tanto para la biomasa

del fuste, de las ramas y de las hojas, el modelo que presentó el Índice de Furnival más bajo es de la forma  $\text{Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^{\beta_2} \cdot \text{H}^{\beta_3}$ .

Para el caso de la biomasa aérea total y de la biomasa radical, el menor Índice de Furnival se verificó con la función  $\text{Biomasa} = \beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} \cdot \text{H}^{\beta_2}$ , seguida del mismo modelo que mejor ajustó para cada compartimiento aéreo por separado.

**Tabla 6:** Valores del Índice de Furnival de los modelos ponderados para la biomasa aérea

Funciones	Aérea		Fuste		Ramas		Hojas		Radical	
	Pond.	I. F.	Pond.	I.F.	Pond.	I.F.	Pond.	I.F.	Pond.	I.F.
$b_0 + b_1 \cdot \text{DAP}^2$	1/D5	115,8	1/D5	104,4	1/D3	30,9	1/D2	2,51	1/D	42,7
$b_0 + b_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot \text{H}$	1/D5	94,5	1/D5	79,5	1/D3	30,3	1/D	2,50	1/D	47,1
$b_0 + b_1 \cdot \text{DAP} + b_2 \cdot \text{H}$	1/D4	220,2	1/D4	206,1	1/D3	33,4	1/D2	2,10	1/D	38,1
$b_0 + b_1 \cdot \text{DAP}^2 + b_2 \cdot \text{H}$	1/D5	116,6	1/D5	105,4	1/D3	30,75	1/D2	2,29	1/D	38,4
$b_0 + b_1 \cdot \text{DAP}^{b_2} \cdot \text{H}^{b_3}$	1/D4	93,5	1/D4	<b>79,1</b>	1/D3	<b>29,0</b>	1/D2	<b>2,09</b>	1/D	34,0
$b_0 \cdot \text{DAP}^{b_1} \cdot \text{H}^{b_2}$	1/D4	<b>90,3</b>	1/D3	94,8	1/D3	30,5	1/D3	2,26	1/D	<b>33,4</b>
$b_0 \cdot \text{DAP}^b$	1/D4	130,1	1/D3	145,8	1/D3	30,1	1/D3	2,61	1/D	34,8

Aclaraciones: Pond.: ponderador; I.F.: índice de Furnival

#### 4.2.2 Biomasa aérea

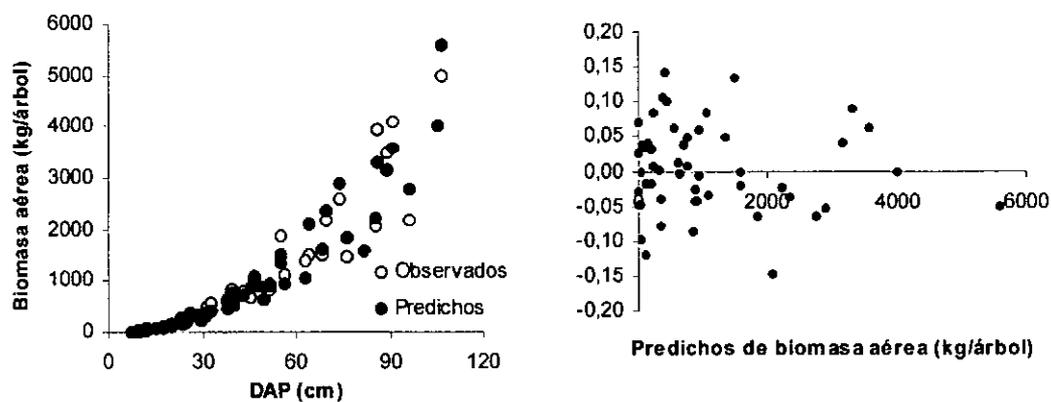
La tabla 7 presenta las ecuaciones con los mejores ajustes para cada compartimiento de la biomasa aérea y para la biomasa aérea total, así como los estadísticos de bondad del ajuste.

**Tabla 7:** Funciones de biomasa del fuste, ramas, hojas y total aérea que presentaron los mejores ajustes

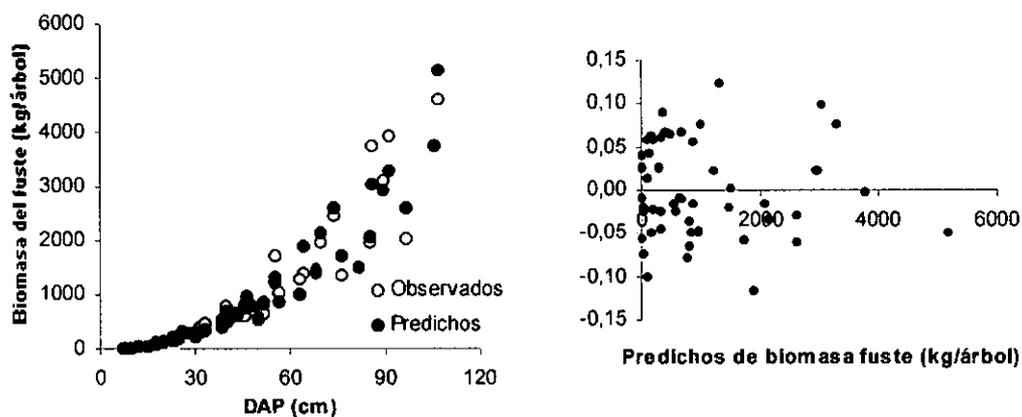
Variable dependiente	Función	$r^2$	$S_{xy}(^*)$
B. fuste (kg/árbol)	$-10,77321293+0,02445014 * DAP^{1,82698029} * H^{1,1128900}$	0,962	0,0575
B. ramas (kg/árbol)	$9,373116783+0,017034830 * DAP^{1,329011862} * H^{1,120232356}$	0,679	0,1278
B. hojas (kg/árbol)	$-0,139025203+0,005041522 * DAP^{0,868515963} * H^{1,184905810}$	0,551	0,0566
B. aérea (kg/árbol)	$0,027096529 * DAP^{1,776039101} * H^{1,176318280}$	0,963	0,0653

Aclaraciones:  $S_{xy}$ = error standard (corresponde a la función ponderada)

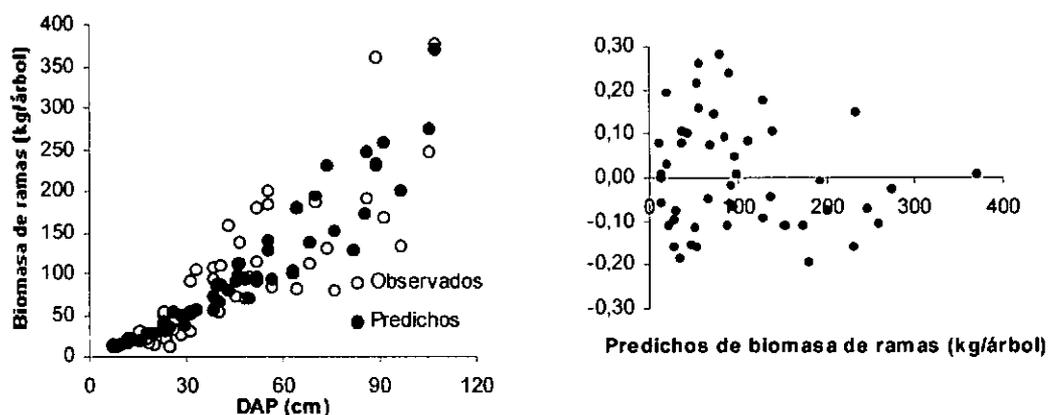
La relación entre los valores de biomasa aérea, del fuste, de las ramas y de las hojas observados y predichos en relación al DAP y los residuales ponderados de las funciones se muestran en la figura 13, 14, 15 y 16.



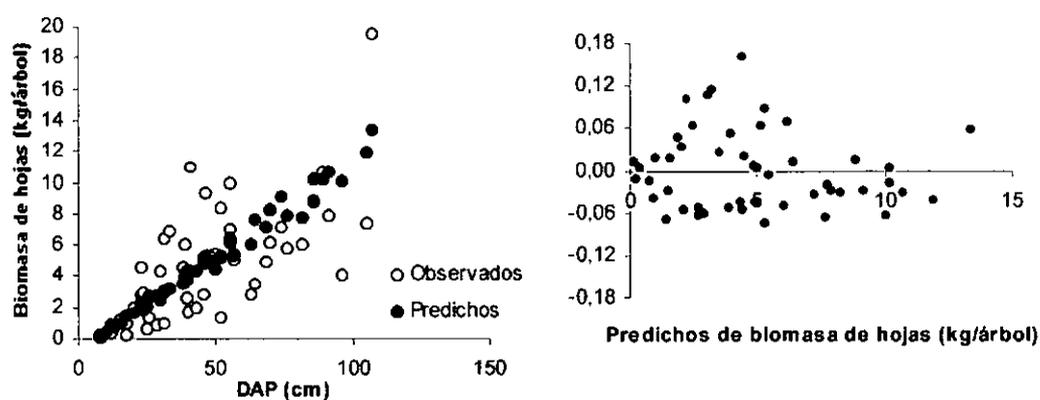
**Figura 13 :** Valores de biomasa observados y predichos por la función seleccionada de la parte aérea total en relación al DAP (izq.), y el gráfico de residuos (der.).



**Figura 14:** Valores de biomasa observados y predichos por la función seleccionada del fuste en relación al DAP (izq.), y el gráfico de residuos (der.).



**Figura 15:** Valores de biomasa observados y predichos por la función seleccionada de ramas en relación al DAP (izq.) y el gráfico de residuos (der.).



**Figura 16:** Valores de biomasa observados y predichos por la función seleccionada para las hojas en relación al DAP (izq.) y el gráfico de residuos (der.).

### 4.2.3 Biomasa radical

La función seleccionada que mejor ajustó los valores de la biomasa radical se presenta a continuación. La expresión gráfica aparece en la figura 17.

Variable dependiente	Función	$S_{xy}^{(*)}$	$r^2$
B. raíz (kg/árbol)	$0,335841524 * DAP^{1,391627694} * H^{0,331357352}$	0,968	0,0575

Aclaración: (\*) corresponde a la función ponderada

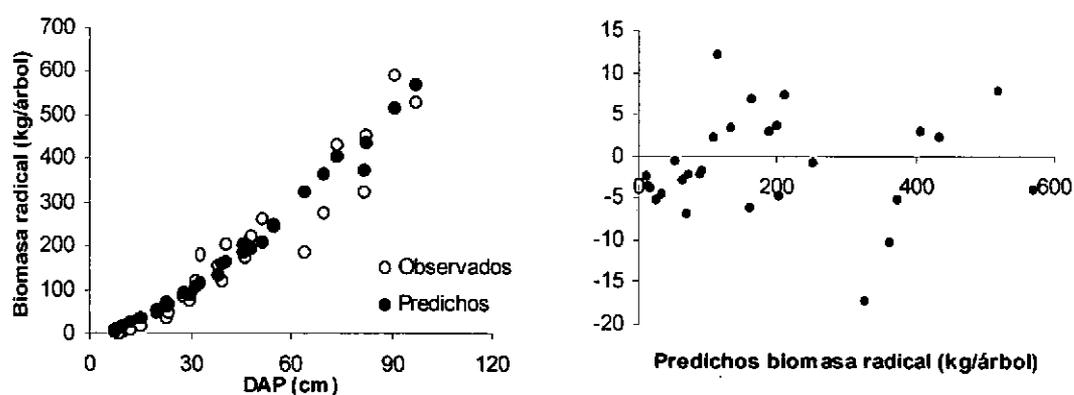


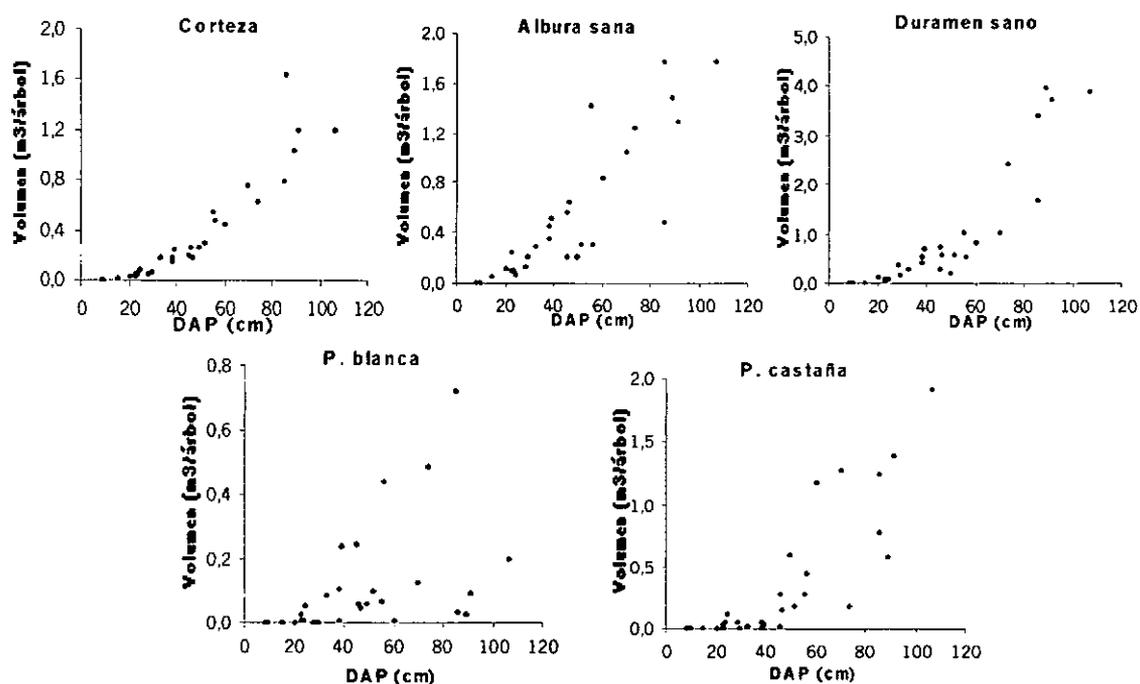
Figura 17: Valores de biomasa observados y predichos por la función seleccionada de la raíz en relación al DAP (izq.) y el gráfico de residuos (der.).

### 4.2.4 Biomasa de las pudriciones

Como se explicó en la metodología, para la determinación de las pérdidas de biomasa por las pudriciones se procedió a la estimación de cada componentes de la madera mediante la determinación de sus volúmenes y densidades básicas. A continuación se presentan los resultados de ambos estudios.

#### 4.2.4.1 Volumen de los componentes

La figura 18 presenta la relación entre el volumen de cada uno de los componentes de la madera y el DAP. Tanto la corteza, la albura, como el duramen sano se incrementan con el aumento del DAP. La incidencia de las pudriciones, que es el aspecto más importante a evaluar de estos resultados, muestra diferencias entre la pudrición blanca y castaña. La pudrición blanca puede afectar al fuste en proporciones variables, sin mostrar ninguna tendencia clara respecto al DAP. Sin embargo su incidencia no supera en ningún caso 0,8 m<sup>3</sup> por árbol.



**Figura 18:** Relación Volumen-DAP de los componentes de la madera del fuste de los árboles muestra.

La pudrición castaña, por el contrario, muestra una clara tendencia a

incrementarse con el aumento del DAP, sobre todo a partir de 40-50 cm, pudiendo llegar a afectar hasta 2 m<sup>3</sup> del fuste por árbol.

#### 4.2.4.2 Densidades

La tabla 7 muestra los valores promedios y la variación de las densidades básicas de cada componente. La corteza fue la que presentó la mayor densidad básica, seguida del duramen sano, la albura, la pudrición castaña y por último la pudrición blanca. Por descomposición, la densidad de la pudrición castaña se redujo, en promedio, un 27 % respecto a la del duramen sano, mientras que la densidad de la pudrición blanca es un 57 % menor que la de la madera sana.

Puede observarse, además, la mayor variación de la densidad de las pudriciones respecto a los demás componentes. Esta se debe a que la acción de los hongos de la descomposición es un proceso dinámico que está en evolución, por lo que dentro de las pudriciones existen distintos grados de deterioro.

**Tabla 8:** Densidad de cada componente de la madera del fuste (gr/cm<sup>3</sup>)

Tipos	N	$\bar{x}$	s	CV (%)
Corteza	527	0,532	0,0622	11,69
Albura	487	0,432	0,0352	8,16
Duramen sano	459	0,482	0,0403	8,35
P. castaña	154	0,351	0,0499	14,23
P. blanca	54	0,206	0,0662	32,14

Aclaraciones: n= número de probetas;  $\bar{x}$  = promedio, s= desvío standard; CV= coeficiente de variación.

#### 4.2.4.3 Pérdidas de biomasa

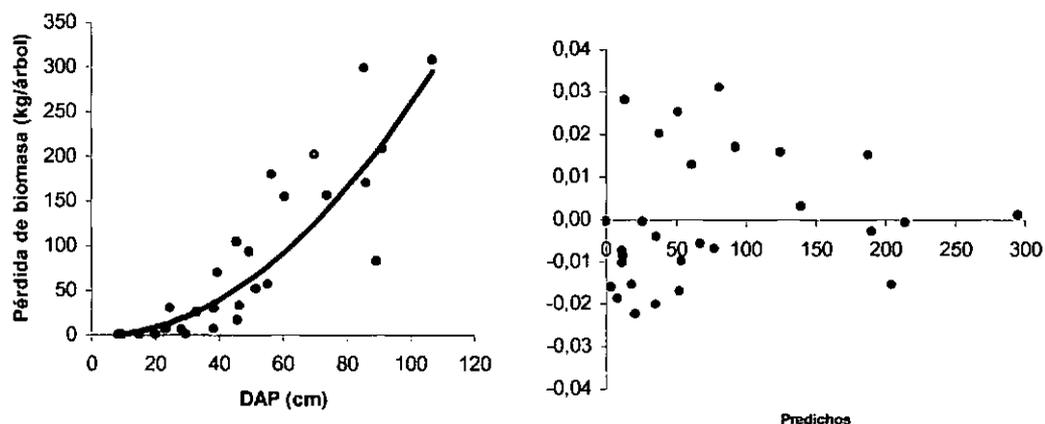
Determinados los volúmenes y densidades de los componentes del fuste, se estimó la biomasa bruta y neta, como se explicó en la metodología. La diferencia entre ambas es la pérdida de biomasa por acción de los hongos descomponedores. Como la incidencia de las pudriciones aumenta con el tamaño de los árboles -muy probablemente asociado a la edad-, a partir de variables de fácil medición del árbol se podrían estimar tales pérdidas. Se procedió, entonces, al ajuste de funciones entre la pérdida de biomasa del fuste (biomasa bruta-biomasa neta) el DAP y la altura total de los árboles. Las funciones se ponderaron y se seleccionaron en base al índice de furnival.

Del análisis surgió que no era conveniente elegir a la función que tuvo el índice más bajo (pérdida de biomasa=  $b_0+b_1 \cdot \text{DAP}+\text{DAP}^2$ ) porque sobreestima en las clases diamétricas superiores. En su defecto se prefirió otra función que tuvo también un buen comportamiento en el ajuste, que además es más simple:

Variable dependiente	Función	$S_{xy}^{(*)}$	$r^2$
Pérdida de biomasa (kg/árbol)	$-2,320350 + 0,026038 * \text{DAP}^2$	0,760	0,0156

Aclaración: (\*) corresponde a la función ponderada

En la figura 19 se observa como aumenta la pérdida de biomasa en relación directa al DAP.



**Figura 19:** Función de pérdida de biomasa producto de las pudriciones de la madera en relación al DAP (izq.) y la distribución de residuos (der.).

Según la función ajustada, en el bosque natural de lenga, un árbol de 40 cm puede perder, por efecto de las pudriciones, en promedio, 50 cm de su masa, mientras que cuando ronda 1 m de DAP, podría perder alrededor de 300 kg.

#### 4.3 Contenido de carbono de los componentes de la madera

Los resultados del análisis químico de carbono se presentan en la tabla 11. El análisis de la varianza indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Mediante el test *least significant difference* para comparaciones múltiples, se determinó que no existen diferencias significativas en el contenido de carbono entre la corteza y la pudrición castaña, que poseen en promedio 42,7 %, por un lado, y entre la albura, el duramen y la pudrición blanca, con 41,2 %, por otro. Al mismo tiempo se corroboró que existen diferencias significativas entre los componentes de ambos grupos.

**Tabla 11:** Estadísticos del contenido de carbono de cada componente de la madera y y sus comparaciones múltiples por el método de *least significant difference*

Componente	n	$\bar{x}$	s	CV (%)
<b>Corteza</b>	15	42,71 (**)	1,09	2,56
<b>Albura sana</b>	15	41,18 (*)	1,02	2,48
<b>Duramen sano</b>	15	41,38 (*)	0,68	1,63
<b>P. castaña</b>	15	42,69 (**)	0,83	1,95
<b>P. blanca</b>	15	41,08 (*)	0,72	1,74

Aclaraciones: entre (\*) y (\*\*) existen diferencias significativas (p:0,05)

#### 4.4 Factores de expansión y reducción

La figura 20 y la tabla 10 presentan los factores de expansión en relación al DAP. Si bien es de esperar una reducción del factor de expansión con el aumento del DAP, es notorio en este caso como ya se reduce fuertemente en los diámetros diámetros menores. Entre 10 y 19 cm de DAP el factor de expansión alcanza en promedio un valor de 2,31 y entre 20 y 29 un valor de 1,62. A partir de 60 cm se estabiliza, reduciéndose 0,02 puntos por cada clase de 10 cm de diámetro.

**Tabla 9:** Factor de expansión promedio por clase diamétricas

DAP (cm)	Factor de expansión
10-19	2,31
20-29	1,62
30-39	1,46
40-49	1,39
50-59	1,34
60-69	1,30
70-79	1,28
80-89	1,26
90-99	1,24

En la tabla 11 se muestran los valores de los factores de reducción por clase diamétrica y el promedio, obtenidos por ajuste lineal de los árboles muestra. Este se reduce con el aumento del DAP, debido al efecto de las pudriciones ya expresado en varias oportunidades.

**Tabla 11** : Factores de reducción de la lenga en Tierra del Fuego promedio por clase diamétrica de 20 cm

DAP (cm)	Factor de reducción
10-30	0,943
30-50	0,935
50-70	0,927
70-90	0,919
90-110	0,911
Promedio	0,927

## 5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

### 5.1 Distribución de biomasa en los árboles muestra

La elaboración de funciones de biomasa de validez regional en base a muestreos destructivos están asociados a altos costos y compleja logística, debido a los esfuerzos de pesado de todo el árbol en el campo, máxime si se incluye la biomasa radical (McDicken, 1997), y los traslados para abarcar una amplia gama de sitios y tamaño de los árboles. En el presente estudio, la selección de las áreas de muestreo en base a información previa, abarcando una amplia variación de calidades de sitio, pero limitada a una zona geográfica (lo cual simplificó la logística) fue satisfactoria. Esto se concluye al comparar la distribución de frecuencia diamétrica de los árboles muestra y la relación altura-

DAP con las del Inventario Forestal provincial (Wabo, 1998).

Los valores de biomasa de los árboles individuales, para un rango de DAP entre 10 y 106 cm, fueron para la parte aérea entre 14 y 5000 kg, mientras que para la parte subterránea fue entre 2 y 587 kg.

Los valores de biomasa en relación al DAP obtenidos en este trabajo fueron menores para la parte aérea y mayores para la parte subterránea respecto a los registrados por Weber (2000) quien estimó el carbono acumulado en un bosque vírgen en Tierra del Fuego. Una razón de esta diferencias puede radicar en que Weber realizó tal determinación sobre una muestra mucho más pequeña: 14 de la parte aérea y 13 de la parte subterránea, y limitado a un rodal de calidad de sitio homogénea, mientras nosotros trabajamos con 49 árboles de la parte aérea y 28 de la subterránea, además de abarcar una amplia variedad de condiciones de sitios

La distribución de biomasa en los compartimientos de los árboles muestra fue, en promedio la siguiente: en el fuste: 62,9 %; en las ramas 18,6 %; en las hojas 0,8 % y en las raíces 17,7 %. Richter & Frangi (1992) determinaron la distribución de biomasa en los árboles de un bosque de lenga vírgen en la Laguna Victoria (Tierra del Fuego), y encontraron la siguiente proporción: 64,5 % en el fuste, 21,7 % en las ramas, 0,38 % en las hojas y 13,3 % en las raíces.

Las diferencias con nuestros resultados -principalmente respecto a las hojas y raíces- pueden deberse a que los resultados de Richter & Frangi corresponden al nivel de un rodal específico, mientras que los nuestros son promedios de árboles muestra de una amplia variedad de rodales. Otra diferencia es que en nuestro caso se pesó el sistema radical completo ( $\varnothing > 0,5$  cm), mientras Richter & Frangi (1992) de cada árbol muestra pesaron una submuestra

de las raíces (Richter -comunicación personal- 2001).

Los valores encontrados en nuestro estudio están aproximadamente dentro del rango de los citados para otros bosques de *Nothofagus*. En bosques de *Nothofagus fusca* y *Nothofagus menziesii*, Stewart & Burrow (1994) informaron la distribución de la biomasa aérea. Encontraron que las hojas representaron del 1 al 4 %; los fustes de 50 al 70 % y las ramas de 8 al 17 %. La biomasa radical de tales bosques se estimó entre el 12 y el 33 % de la biomasa arborea total (Veblen *et al.* 1996).

La relación biomasa radical/aérea de los árboles muestra determinada en este estudio fue, en promedio, de 0,22. Este valor está por debajo del promedio de 0,26 informado por Cains (1997) para especies de bosques templados, sobre el límite del cuartil inferior (0,22). Los resultados indican una mayor participación de las raíces en las clases diamétricas menores, que tiende a reducirse en las clases mayores. La copa (ramas y hojas) presentan mayor participación en los árboles de menor diámetro, estabilizándose rápidamente cerca de los 20 cm de DAP. Esta reducción de la participación de las copas y las raíces se debe al efecto de la competencia (Mitscherlich, 1975), que para la lenga en Tierra del Fuego es muy alta debido a las condiciones de humedad favorables para el crecimiento (Bava, 1997).

## **5.2 Funciones de biomasa**

La estimación de la biomasa total de los árboles a partir de la de cada uno de sus compartimentos, tiene la ventaja que los resultados permiten ser utilizados para diferenciar la distribución de biomasa según edades, estructura de rodales,

efectos de intervenciones silviculturales, etc. Navar *et al.* (2001) observó que la determinación de la biomasa total en forma aditiva, a partir de la de sus compartimientos, en plantaciones forestales en Durango, México, presentaron las mejores bondades en el ajuste.

En el presente estudio los modelos que mostraron los mejores ajustes para cada compartimiento, en base al índice de Funnival, fueron no lineales ponderados de la forma **Biomasa =  $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^{\beta_2} \cdot H^{\beta_3}$**  y **Biomasa =  $\beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2}$** . Estos tienen la ventaja que presentan mayor flexibilidad, y no necesitan de correcciones, como es el caso de los modelos logarítmicos. Mediante la ponderación se logró el objetivo de homogeneizar las varianzas, como se verifica en los gráficos de los residuos. Los  $r^2$  de la biomasa aérea, del fuste y de la biomasa radical son altos, mientras que los de la biomasa de ramas y hojas son menores debido a la alta variabilidad asociada a estos componentes (como se ve en los gráficos de los residuales en las figuras 15 y 16).

### **5.3 Volumen y densidad de los componentes del fuste**

Los valores de las densidades básicas de cada componente de la madera son comparables con los observados en un estudio realizado en el norte de la distribución de la especie (Loguercio *et al.*, 2001). Respecto a aquél estudio, se observaron ciertas diferencias en las densidades de la pudrición castaña (0,307 gr/cm<sup>3</sup> en el Lago La Plata, contra 0,351 gr/cm<sup>3</sup> en este estudio), y de la pudrición blanca (0,177 gr/cm<sup>3</sup> en el Lago La Plata, contra 0,207 gr/cm<sup>3</sup> en este estudio). En el caso de la pudrición castaña podría atribuirse a que los listones trasladados al laboratorio en el presente trabajo perdieron parte de las porciones más podridas

(sin estructura); se desconocen las causas de las diferencias en la pudrición blanca.

#### **5.4 Pérdidas de biomasa por las pudriciones**

A partir de la determinación de la biomasa bruta y neta del fuste fue posible estimar las pérdidas de biomasa debidas a las pudriciones. La función de pérdida de biomasa a partir del DAP permitirá realizar estimaciones de la biomasa por hectárea que se ha descompuesto por la acción de los hongos decomponedores. Considerando la alta longevidad de la lenga en bosques naturales y asumiendo una correlación positiva entre el DAP y la edad, el incremento de las pérdidas de biomasa en árboles de mayor tamaño podría deberse a la mayor formación de duramen de los árboles maduros y sobremaduros, que combinado con el aumento de probabilidad de producirse heridas por caídas de ramas, roce por viento, daños mecánicos en raíces, etc., a lo largo de los años, favorecería la entrada y propagación de los hongos degradadores de la madera. Conclusiones similares fueron presentadas por Pesutic (1978).

La observación del marcado aumento del volumen de la pudrición castaña a partir de 50-60 cm, permitiría concluir que desde el punto de vista del manejo silvicultural para fines de almacenamiento de carbono, en los bosques productivos de lenga no sería recomendable conservar individuos con DAP mayor a dicho tamaño.

## 5.5 Factores de expansión y reducción

El valor del factor de expansión se reduce en la medida que aumenta el DAP. Esta observación coincide con la generalización realizada por Schroeder *et al.* (1997) para los bosques de zonas templadas. Sin embargo en este estudio se observó que tal reducción se produce ya en las clases diamétricas más bajas. Esto se corresponde con lo explicado en el punto 5.1 respecto a la alta competencia a la que se someten los árboles desde jóvenes, debido a la alta densidad favorecida por condiciones ambientales óptimas.

El factor de reducción promedio resultó algo menor en las clases de DAP < 50 cm y superior en las clases de DAP mayores, respecto a un estudio similar en las cercanías del lago La Plata en la provincia del Chubut (Loguercio, *et al.* 2001). El factor de reducción promedio en este estudio, sin embargo, fue algo menor (0,927 contra 0,949). Esta tendencia en la diferencia también se observa respecto a una estimación de una distribución teórica de las pérdidas de densidad por las pudriciones por clase diamétrica realizada por Weber (1999). Si bien su base de datos es insuficiente para la estimación de las pérdidas respecto a nuestro estudio, la degradación de listones muestras muy podridos (p. castaña) antes de llegar al laboratorio, pueden ser causa de cierta subestimación de las pérdidas de masa por la reducción de densidad debida a estas pudriciones.

## 5.6 Contenido de carbono

Los contenidos de carbono de cada uno de los componentes de la madera fueron sorprendentemente bajos, en relación a los observados por Weber (2000)

y Boswald *et al.* (2001). Mientras en aquellos estudios rondaron entre 0,43 - 0,45, en el presente estudio variaron entre 0,41 - 0,43. A fin de corroborar estas diferencias se realizarán nuevas determinaciones a partir de otro conjunto de probetas conservadas en el laboratorio.

Las diferencias significativas de contenidos de carbono de la corteza y la pudrición castaña respecto a los demás componentes se debe a que estos últimos concentran mayor proporción de lignina con compuestos que conservan más carbono. En el caso de la pudrición castaña se debe a que los hongos de esta pudrición consumen celulosa, aumentando la participación relativa de lignina en la madera remanente (Alexopoulos *et al.*, 1996).

### **5.7 Algunas consideraciones finales**

El sistema de ecuaciones elaboradas en el presente estudio es la herramienta primaria para poder realizar cuantificaciones confiables del stock de carbono en los árboles de los bosques de lenga de Tierra del Fuego. También permiten estimar los cambios que se producen a lo largo de los ciclos de vida de los rodales en base a información de inventarios permanentes o de modelos de crecimiento. El uso de estas ecuaciones, aplicadas a la información de cambios de estructura por el uso tradicional, permitirá avanzar en la determinación de líneas de base y en evaluaciones de adicionalidad de carbono en actividades de manejo forestal específicas. Asimismo, se podrá aumentar la confiabilidad de la estimación del aporte que los bosques de lenga de Tierra del Fuego hacen a los inventarios de "emisión-mitigación" que el país está comprometido a presentar periódicamente a la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Debido al interés en el que se encuadra este estudio para la provincia de Tierra del Fuego, haré a continuación algunas consideraciones que surgen de las últimas definiciones en las negociaciones internacionales para la inclusión de los proyectos forestales dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Luego de prolongadas discusiones y postergación en las definiciones, en la última Conferencia de las Partes 6 (COP6 -bis) se lograron ciertos acuerdos en cuanto al Sector de Usos del Suelo, Cambios de Usos del Suelo y las Actividades Forestales. Básicamente podrán ser reconocidas actividades de *Forestación y Reforestación* para los proyectos de carbono, excluyendo las que contribuirían a reducir emisiones por evitar *Deforestación* (preservación de bosques).

A esta decisión se llegó luego de una larga puja, debido a que existen países y regiones con potencial y muy interesados en utilizar los mecanismos de Kioto para la preservación de sus bosques. Ejemplo de ello hay en Bolivia y Costa Rica, entre otros, donde proyectos de Conservación de Bosques para evitar emisiones han sido reconocidos por la Convención de Cambios Climático como Actividades Implementadas Conjuntamente. Sin embargo, según sea el avance de las negociaciones y el éxito de los proyectos forestales del Protocolo de Kioto, no debe descartarse que esta opción pueda ser incluida en el próximo periodo de compromiso de reducción de emisiones.

Sintetizando, por esta razón, por lo menos para el primer período de compromiso del Protocolo de Kioto (2008-2012), el potencial de los proyectos forestales de secuestro de carbono, estará en áreas libres de bosque, aptas para forestación y en áreas de bosques degradados.

En Tierra del Fuego, donde las condiciones ambientales son muy favorables para el desarrollo de los bosques (principalmente por el régimen de

precipitaciones), donde hasta en los bosques más fuertemente intervenidos la regeneración natural se instala rápida y abundantemente, la posibilidad actual de los proyectos de carbono usando los mecanismos del Protocolo de Kioto se ven, en principio, limitadas.

Weber (2000) estimó los cambios de los flujos de carbono por la aplicación de sistemas silviculturales de manejo alternativos (tala rasa, cortas de protección y entresaca) y concluyó que si solo se considera el carbono del bosque, ninguna de las alternativas alcanzaría el nivel de almacenamiento registrado en el bosque virgen. La situación cambia si se incluye la prolongación del almacenamiento en los productos, la sustitución de materias primas por madera y la utilización de la misma, luego de su vida útil, como biocombustible. En ese caso el manejo sustentable es más efectivo en términos de la reducción de emisiones que el bosque virgen, aumentándose esta diferencia a lo largo de los ciclos de manejo forestal.

Una opción que se visualiza como con más posibilidad de cumplir con los requisitos actuales impuestos a los proyectos de carbono, es la recuperación de los bosques de lenga degradados, tanto quemados, como sobre todo, los conocidos como "capados". Según la información del Inventario Forestal Provincial, existen 21.300 ha de bosques degradados: 14.200 ha de capados y el resto de quemados (Informe interno del Inventario Forestal Provincial, Dirección de Bosques de Tierra del Fuego, 2000). Los "capados" son áreas de bosques de lenga en las que hubo un cambio de uso del suelo, de bosque a la actividad ganadera, por corta y muerte de los árboles remanentes. Luego se mantuvo el suelo libre de árboles por intenso pastoreo, y por lo tanto con un nivel bajo de carbono, si se lo comparara con el bosque denso.

La implementación de medidas de recuperación mediante regeneración natural o reforestación es una opción que con seguridad generará una adicionalidad de carbono, además de lograr el efecto positivo de restaurar las funciones ambientales que cumplían los bosques de lenga originales.

Para una evaluación de esta opción sería necesario elaborar la línea base actual, que caracterice el contenido de carbono del sistema de capados y por otro simular la capacidad de fijación del proceso de recuperación en base a información de bosques coetáneos desarrollados en similares condiciones de sitio que los capados, aplicando las funciones desarrolladas en este estudio.

Debe decirse, por otro lado, que no existen experiencias de recuperación de capados, pero es factible desarrollar una adecuada tecnología de plantación con lenga. Una mínima inversión en experimentación permitiría ajustar una propuesta. También, a fin de dimensionar la factibilidad local de un proyecto de este tipo, es necesario realizar una caracterización socioeconómica, que incluya la ubicación, tenencia de la tierra y distribución de las áreas con capados y la rentabilidad y sustentabilidad de la actividad ganadera involucrada.

Por último, otra posibilidad a explorar para la realización de proyectos forestales de carbono en los bosques de lenga de Tierra del Fuego, podría ser el manejo silvicultural de los bosques aprovechados, que se estima que en la provincia ocupan cerca de 55.000 ha (Yapura 2001). En estos bosques existen árboles sobremaduros, que quedaron como remanentes de las cortas anteriores, conviviendo con un segundo estrado de regeneración. Si mediante los raleos de liberación y conducción se redujera el nivel de las pudriciones y mediante la aplicación de técnicas de aprovechamiento de bajo impacto, se favoreciera el crecimiento acelerado de la nueva generación por la reducción de competencia,

sería posible lograr adicionalidad de carbono, en comparación con los flujos de carbono en la situación sin manejo forestal. Esta posibilidad, de todos modos, resulta más incierta en cuanto a su efectividad en términos del servicio ambiental de fijación de carbono que la recuperación de capados, y por ello para llegar a conclusiones definitivas sería necesario realizar experiencias de manejo como las expuestas y monitorearlas durante varios años.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Alexopoulos C.J., Mims C.W. & Blackwell M.**, 1996. *Introductory Micology*. Fourth Edition. John Wiley & Sons. USA. 569-573.
- Bava J.** 1997. Aportes Ecológicos y Silviculturales a la transformación de bosques vírgenes de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) en bosques Manejados en el Sector Argentino de Tierra del Fuego. Publicación Técnica Nº 29. CIEFAP. 138 p.
- Böhm W.** 1979. *Method of Studing Root Systems*. Ecological Studies. Springer-Verlag Berlin Heirdelberg. New York. 188 p.
- Böswald K., J. D. Lencinas & G. Loguercio** 2001. Carbon Reservoirs in Temperate South-American *Nothofagus* Forests. *The Scientific World*. (aceptado para su publicación, en prensa).
- Cairns M. A., S. Brown, E. H. Helmer & G. A. Baumgardner** 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* (1997) 111:1-11.
- Cwielong P. P. & M. Rajchenberg** 1995. Wood-rooting fungi on *Nothofagus pumilio* in Patagonia, Argentina. *Eur. J. For. Path.* 25 (1995) 47-90.
- Clutter J., J. Forston, L. Pienaar, G. Brister, R. Bailey**, 1992. *Timber Management. A quantitative approach*. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.
- Elliot K. J. & B. D. Clinto**, 1993. Equations for Estimating Biomass of Herbaceous and Woody Vetetation Early-Succesional Southern Appalachian Pine-Hardwood Forests. Southeastern Forest Experiment Station. Research Note

- SE-365. Forest Service. USA.
- Teller A.** 1988. Biomass, productivity and wood waste evaluation in a spruce (*Picea abies*) forest (Strainchamps 1983). *Commonw. For. Rev.* 67(2).
- Frangi J. L., L. L. Richter, M.D. Barrera & M. Aloggia** 1997. Decomposition of *Nothofagus* fallen woody debris in forests of Tierra del Fuego, Argentina. *Can. J. For. Res.* 27:7-14.
- Yapura P.** 2000. Evaluación del estado de los Cuarteles Forestales aprovechados y sus áreas de influencia. Informe Final. Consejo Federal de Inversiones- Provincia de Tierra del Fuego.
- Loguercio G. A. & G. Defossé,** 2001. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, en el SO del chubut, Argentina. Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". Octubre, Valdivia, Chile.
- Loguercio G., A. Jovanovski, M. Acetti & E. Asenjo,** 2001. Pérdidas de biomasa en árboles vivos de lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser por efecto de las pudriciones de la madera. Un método de cuantificación. Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". Octubre, Valdivia, Chile.
- Mitscherlich G.,** 1975. *Wald, Wachstum und Umwelt. III Boden, Luft und Produktion.* J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt an Main, Deutschland (352 p.).
- MacDicken K.G.,** 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Forest Carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). <http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html>.
- Mutarelli E. & N. Orfila** 1969a. Los bosques de Tierra del Fuego y los primeros ensayos de tratamientos para su regeneración, conducción y organización. *Rev. For. Arg.* Año XIII, 4. 123-137 p.
- Mutarelli E. & N. Orfila** 1969b. Plan de investigaciones silvopastorales en las etapas de ordenación, recuperación, y reproducción económica de los bosques andino-patagónicos. *Actas del 1º Cong. For. Arg.* P. 722. Buenos Aires.
- Mutarelli E. & N. Orfila** 1973. Algunos resultados de las investigaciones de

- manejo silvicultural que se realizan en los bosques andino-patagónicos de la Argentina. Rev. For. Arg. T. 13 (3):69-75.
- Návar, J.; N. González y J. Graciano** 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, Mexico. Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". Octubre, Valdivia, Chile.
- Parresol B. R.** 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons. Forest Science, Vol 45 (4).
- Pesutic V. S.** 1978. Análisis de estructura-estado sanitario en un bosque de lenga. Univ. De Chile. Fac. de Cs. Agr., Vet. y For. Memoria de título Ingeniero Forestal. 68 pp.
- Rajchenberg M. & P. Cwielong** (inedito). The infection of "lenga" (*Nothofagus pumilio*) by *Phellinus andinopatagonicus*.
- Richter L. & J. Frangi** 1992. Bases ecológicas para el manejo del bosque de *Nothofagus pumilio* de Tierra del Fuego. Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata. Tomo 68: 35-52 .
- Schroeder P., S. Brown, J. M.O., R. Birdsey & C. Cieszewski**, 1997. Biomass Estimation for Temperate Broadleaf Forests of the United States Using Inventory Data. Forest Science, Vol 43, N° 3: 424-434.
- Universidad Austral de Chile** 2000. Manual de procedimientos para estudios de biomasa. Proyecto FONDEF: *Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial de carbono*. (no publicado).
- Veblen T. T., R. S. Hill & J. Read** 1996. The Ecology and Biogeography of *Nothofagus* Forests. Yale University Press. New Haven and London.
- Wabo E.** 1998. Inventario Forestal de la Provincia de Tierra del Fuego. Convenio Provincia -Consejo Federal de Inversiones. 28 p.
- Weber M.** 1999. Kohlenstoffvorräte eines *Nothofagus*-Primärwaldes auf Feuerland. Forstw. Cbl. 118(1999): 156-166.
- Weber M.** 2000. Untersuchungen zur Kohlenstoffspeicherung in Lenga- (*Nothofagus pumilio*) Primärwäldern Feuerlands sowie zu den Auswirkungen ihrer Überführung in Wirtschaftswald auf den C-Haushalt. Habilitationsschrift an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität München (en prensa).

**Yapura P.** 2001. Evaluación del estado de los Cuarteles Forestales aprovechados y sus áreas de influencia. Proyecto Provincia de Tierra del Fuego-Consejo Federal de inversiones.

***ANEXO***

# Tierra del Fuego: Composición de los Bosques y Ubicación de los Muestreos

## Referencias

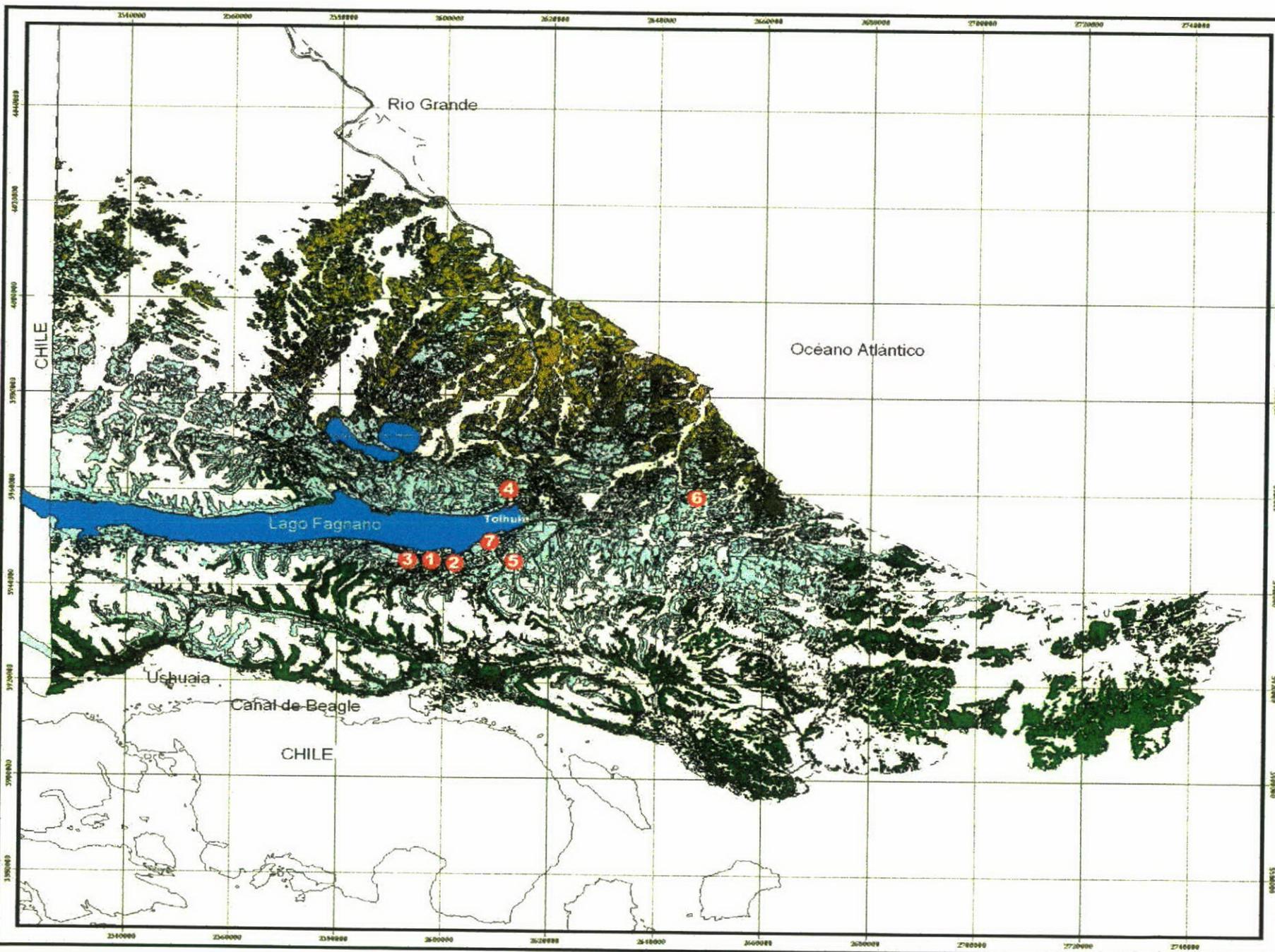
- 2 Ubicación de los Muestreos
-  Ruta 3
-  Lagos
- Composición
-  Bosques de Lengua Puros
-  Bosques de Ñire Puros
-  Bosques Degradados
-  Bosques Mixtos

## Referencias N° de Muestreo

Número	Nombre
1	Laguna Krren
2	Arroyo Cafe
3	Río Milna
4	Cerro Michi
5	Agua Blancas
6	Lote 93
7	Ea. El Valdes

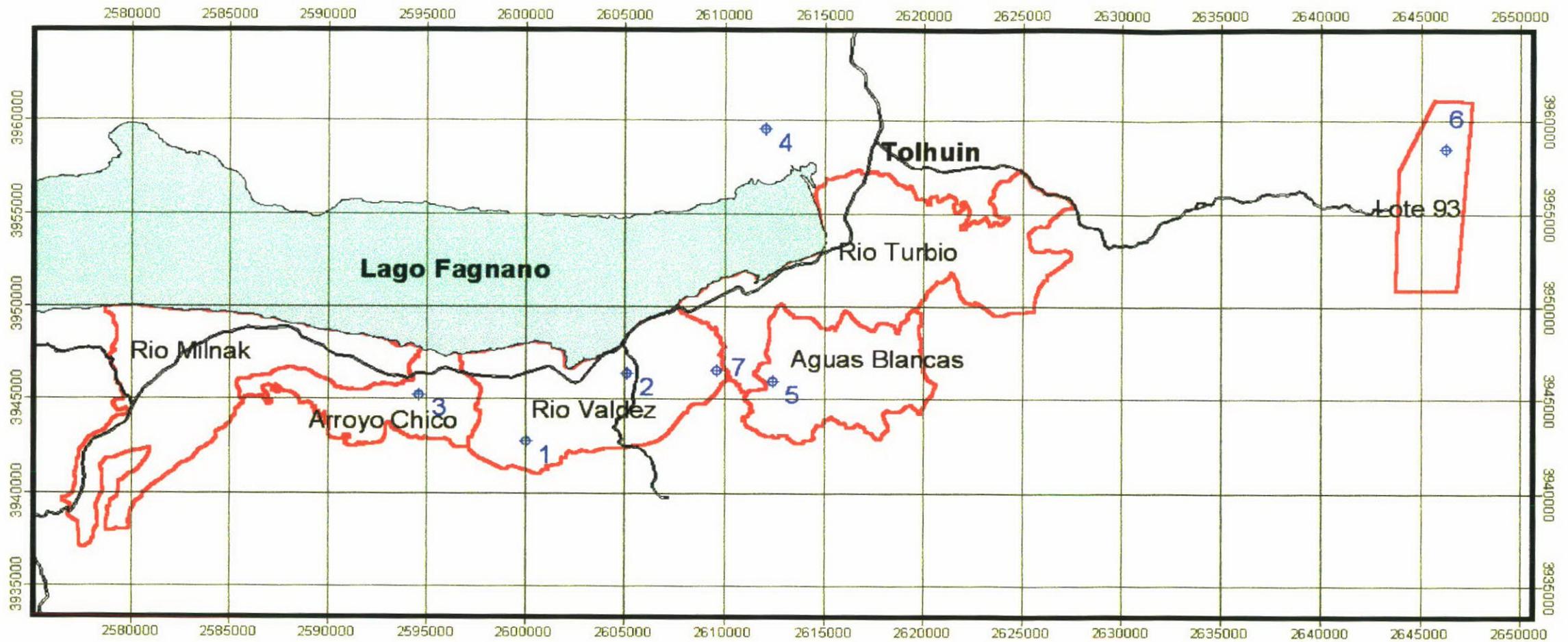


Subsecretaría de Recursos Naturales  
Dirección de Bosques  
Sistemas de Información Geográfica  
Realización: Leonardo Collado  
Julio de 2001



Mapa 1: Distribución de los bosques de Tierra del Fuego y ubicación de los sitios de muestreo

## UBICACION DE LOS SITIOS DE MUESTREO



**Referencias**

- Ruta Nacional 3
- Rutas Complementarias
- Cuarteles Forestales
- Sitios de Muestreo
- Nombre de los Cuarteles



**Nombre de los Sitios de Muestreo:**

Número	Nombre
1	Laguna Krren
2	Arroyo Cafe
3	Río Milna
4	Cerro Michi
5	Aguas Blancas
6	Lote 93
7	Ea. El Valdez

Subsecretaría de Recursos Naturales  
Sistemas de Información Geográfica  
Realización: Leonardo Collado  
Julio de 2001

**Mapa 2: Identificación de las áreas de muestreo en los cuarteles forestales**