



Relaciones entre la estructura forestal y el crecimiento del
bosque de *Nothofagus antarctica* en gradientes de edad y
calidad de sitio

Tesis Doctoral

Doctorando: Horacio Simón Ivancich
Director: Guillermo José Martínez Pastur
Codirectora: María Vanessa Lencinas

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Universidad Nacional de La Plata
Año 2013

RESUMEN

En la Patagonia Argentina los bosques de *Nothofagus antarctica* (ñire) ocupan 751.000 ha extendiéndose desde la provincia de Neuquén (33° S) hasta el canal Beagle (55° S). Del total de esa superficie, 303.000 hectáreas se encuentran ubicadas en Patagonia Sur (101.000 ha en la provincia de Santa Cruz y 202.000 en Tierra del Fuego). El ñire es considerado la especie forestal patagónica de mayor amplitud ecológica por tener la capacidad de crecer y desarrollarse en una gran variedad de ambientes.

Es una especie de gran importancia económica para la región, por su ubicación y distribución, ocupando los sectores donde se realizan gran parte de las actividades agropecuarias de Patagonia Sur. La importancia de los bosques nativos de ñire como sistemas silvopastoriles radica principalmente en su capacidad productiva ganadera y la posibilidad de obtener productos madereros provenientes de las intervenciones silvícolas intermedias.

Son escasos los trabajos publicados vinculados a la biometría de *N. antarctica* en toda la región patagónica, muchos de los cuales no son compatibles entre sí o incluyen un solo factor de influencia en su análisis. Los estudios biométricos forestales son la base para el desarrollo de modelos, los cuales son necesarios para conocer la estructura de los bosques, tanto en el presente como a futuro.

Existen diferencias en la estructura forestal de los bosques de ñire a lo largo de gradientes de edad y calidad de sitio, pero con diferentes relaciones entre las variables cuali-cuantitativas de sus componentes. Es por ello que el crecimiento y dinámica de esos bosques se relaciona de forma diferencial con las distintas variables de la estructura forestal (e.g., clase social, sanidad, diámetro o altura de los árboles) a lo largo de dichos gradientes, afectando la posibilidad de cosecha de estos bosques.

El objetivo general de la presente Tesis fue determinar relaciones entre variables de estructura forestal y productividad del bosque de *N. antarctica*, para sentar pautas de manejo silvícola a los fines de maximizar la producción de madera en el marco de la sustentabilidad del recurso. A partir de estas relaciones se determinarán los factores más influyentes a nivel individual y de rodal, modelizando la respuesta en gradientes de edad y de calidad de sitio.

Se realizaron diversos muestreos en Patagonia Sur, los que incluyeron: (i) la medición de 136 parcelas de diámetro variable en las que se obtuvieron muestras de barreno de todos los individuos medidos para el posterior análisis del crecimiento a nivel individual y de rodal, (ii) la realización de 72 análisis fustales en árboles dominantes para analizar el crecimiento en altura, (iii) la cubicación 423 árboles en 22 localidades para evaluar el volumen total con corteza, (iv) la medición de 506 parcelas de inventario para

evaluar la variación de la densidad de los rodales. Se ajustaron diferentes modelos que explicaron diversos aspectos de la biometría de *N. antarctica* entre los que se incluyeron: modelos de índice de sitio, modelos de crecimiento diamétrico, modelos de volumen a nivel individual y a nivel de rodal, y un modelo de índice de densidad relativa. Los diversos modelos desarrollados fueron aplicados de manera coordinada para el desarrollo un modelo de producción que permitiera predecir la evolución de los rodales de ñire de diferente calidad de sitio.

La estructura forestal mostró una gran variabilidad a lo largo de los gradientes de edad y de calidad de sitio. Siendo esta variabilidad, el fundamento principal para incorporar estos gradientes en las modelizaciones de los diferentes aspectos de la biometría de los bosques de *N. antarctica*.

El modelo de crecimiento en altura e índice de sitio propuesto fue adecuado para ser empleado en una gran diversidad de condiciones de rodal. Sin embargo, los otros modelos de crecimiento presentaron un desarrollo incompleto. Es por ello que se realizaron propuestas de nuevos modelos de crecimiento (en diámetro y volumen total) que incluyeron la incorporación de otras variables (e.g., clases de copa) mediante una propuesta diferente en la toma de datos (e.g., muestras de rodal en lugar de árboles individuales). Tanto el crecimiento en altura como en diámetro presentaron diferentes patrones dependiendo de la calidad de sitio. En las mejores calidades de sitio se alcanzaron los máximos incrementos de manera mas temprana que en las peores calidades de sitio.

Fue posible aplicar metodologías para el cálculo del volumen total que alcancen un equilibrio entre el ajuste y el costo en la toma de datos, con buenos estadísticos y comportamiento biológico (e.g., modelos estándares no tradicionales o modelos de rodal basados en funciones de crecimiento). A partir de un nuevo modelo de crecimiento fue posible determinar el incremento volumétrico en rodales de diferentes calidades de sitio a partir de variables de fácil medición o estimación (clase de sitio y edad).

La densidad de los rodales se estimó mediante una modificación de la propuesta clásica, que incluyó dos modelos anexos que incorporaron las variaciones debido a la dinámica de establecimiento y de regeneración de los bosques naturales. Mediante esta propuesta se pudo estimar la mortalidad de los rodales naturales creciendo en densidad completa a lo largo de un gradiente de diámetros posibles de encontrarse en todo el gradiente de sitios y edades.

Mediante la conjunción de los modelos que describen diferentes aspectos de la biometría de los árboles y rodales de ñire fue posible simular de manera satisfactoria el desarrollo de rodales de diferente calidad de sitio bajo dinámica natural. Los diferentes modelos empleados en el modelo de producción mostraron un elevado grado de

compatibilidad que se manifestó a partir de la simulación de la evolución de los rodales con una satisfactoria significancia biológica.

La base biométrica desarrollada en la presente Tesis, brinda herramientas para predecir el estado y el crecimiento de los árboles y rodales de *N. antarctica* que se encuentran bajo dinámica natural, libres de disturbios catastróficos y de efectos antrópicos como el manejo forestal. Los modelos biométricos representan una herramienta eficaz para la planificación del manejo forestal de los recursos boscosos, y los resultados aquí presentados pueden ser la base para futuras investigaciones que incluyan parámetros de manejo silvicultural en los modelos, que deberán acompañarse con la instalación de redes de parcelas permanentes que abarquen su gradiente geográfico y de calidades de sitio.

ABSTRACT

In Argentine portion of Patagonia, *Nothofagus antarctica* (ñire) forests occupy 751,000 ha between Neuquen province (33° S) and Beagle Channel (55° S). Among the total area, 303,000 ha are located in the Southern Patagonia (101,000 ha in Santa Cruz province and 202,000 ha in Tierra del Fuego province). Ñire is considered the forest species with greater ecological amplitude, presenting the ability to grow and develop in a wide range of environments. Beside this, it is a species with major economic importance in the region, due to its location and distribution, occupying areas where ranching activities of Patagonia Sur were carried out. For this, ñire forests are crucial for silvopastoral systems, mainly for the livestock productive capacity and the possibility to harvest timber products from intermediate silvicultural interventions.

Few published papers linked to biometry of *N. antarctica* across the Patagonian region exists, and where many of them are not compatible with each other, or include only one factor of influence in its analysis. Forest biometric studies are the basis for timber or management models, which are necessities to understand forest structure development, both at present and future scenarios.

There are many differences in forest structure of ñire forests along age and site quality gradients, but presenting different relationships between quali-quantitative variables of its components. For this, growth and dynamics of these forests are differentially related with forest structure variables along these gradients (e.g., social classes, health, tree diameter or tree height), affecting the harvest yield of ñire forests.

The aim of the current Thesis was determine relationships between variables of forest structure and yield of *N. antarctica* forests, establishing guidelines of forest management in order to maximize timber production within the framework of forest sustainability. These relationships determine most of the influential factors at individual and stand level, and modeling the response along age and site quality gradients.

To achieve these objectives, different samplings were conducted in Southern Patagonia, including: (i) measurement of 136 plots of variable diameter, where increment borer samples were obtained from each tree for further analysis at individual and stand level, (ii) 72 stem analysis of dominant trees to analyze height growth, (iii) volume of 426 trees in 22 locations to evaluate the total volume with bark, (iv) 506 inventory plots to assess the changes in the stand density. Different models were fitted to explain several relations of biometry of *N. antarctica*, including: site index models, diameter growth models, volume models at individual and stand level. The different developed models were applied together, trying to coordinate the elaboration of a unique production model, predicting the evolution of ñire stands along age and site quality gradients.

Forest structure showed high variability along age and site quality gradients. Being this variability, the main basis for incorporating these gradients in modeling of different aspects of biometry in *N. antarctica* forests.

The proposed model of height growth and site index was suitable to be employed in a wide variety of stand conditions. However, other growth models presented an unsuitable development. For this reason were performed new proposals of growth models (diameter and total volume) including other kind of variables (e.g., crown class) using a different proposal of data collection (e.g., sampling stands instead individual trees). Height and diameter growth presented different patterns according to site quality. At the best site qualities, the highest growth increase was reached earliest than in the low site qualities. Beside this, it was possible to apply methodologies for estimate total volume reaching a balance between the adjustment and cost in data taking, achieving good statistical parameters and biological behavior (e.g., non-traditional standard models or stand models based on growth functions). With the new growth model was possible to obtain volumetric growth values at stand level for different site qualities using easily measurable or estimable variables (e.g., site class and age).

Stand density was estimated using a modification of one classic proposal, which included two annexed models incorporating changes due to establishment and gap dynamics of the natural forests. With this proposal, it was possible to estimate stand mortality in a full density stand along a full gradient of diameters founded in the site quality and age gradients.

Through these adjusted models, describing different aspects of biometry of individual trees and whole stands, was successfully possible simulate the development of full density stands at different site quality under a natural self-thinning dynamics. The different models used in this production model presented a high degree of compatibility manifested with the good evolution of the stands with a satisfactory biological significance.

The biometric basis developed in this Thesis, provides useful tools to predict the status and growth of trees and stands of *N. antarctica* under a natural dynamic, free of catastrophic disturbances or anthropogenic effects such as forest management. Biometric models represent an effective tool of forest management planning, and these results presented here can potentially the basis for future research involving silvicultural management parameters in these models. However, these new model development must be accompanied by the installation of networks of permanent plots covering the geographical and site quality gradients.

ÍNDICE GENERAL

RESÚMEN.....Pp 1.

ABSTRACT.....Pp 4.

ÍNDICE GENERAL.....Pp 6.

CAPÍTULO I: Introducción general.....Pp 9.

1.1. Los bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur

1.2. Uso histórico y propuestas de manejo

1.3. Biometría forestal

1.4. Hipótesis de trabajo

1.5. Objetivo general

CAPÍTULO II: Crecimiento en altura; Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio.....Pp 17

2.1. Introducción

Objetivos particulares

2.2. **Materiales y Métodos**

2.2.1. *Muestreo*

2.2.2. *Análisis de la muestra*

2.2.3. *Selección de modelos*

2.2.3. *Ajuste y evaluación de modelos*

2.3. **Resultados**

2.4. **Discusión**

2.5. **Conclusiones particulares**

CAPÍTULO III: Estructura forestal de los bosques de *Nothofagus antarctica* a lo largo de gradientes de edad y calidad de sitio.....Pp 33.

3.1. Introducción

Objetivos particulares

3.2. **Materiales y Métodos**

- 3.2.1. Toma de datos
- 3.2.2. Análisis de la muestra
- 3.3. **Resultados**
- 3.4. **Discusión**
- 3.5. **Conclusiones particulares**

CAPÍTULO IV: Crecimiento diamétrico; familia de ecuaciones simples vs. ecuaciones integrales.....Pp. 49.

4.1. Introducción

Objetivos particulares

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Toma de datos y análisis de la muestra

4.2.2. Ajuste y evaluación de modelos

4.3. Resultados

4.3.1 Modelos individuales por clase de sitio y clase social

4.3.2 Modelo Integral de crecimiento individual

4.4. Discusión

4.5. Conclusiones

CAPÍTULO V: Desarrollo de modelos a escala individual y de rodal para predicción del volumen.....Pp 74.

5.1. Introducción

Objetivos particulares

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Modelos individuales

5.2.1.1. Ecuaciones locales

5.2.1.2. Ecuaciones locales integradas

5.2.1.3. Ecuaciones estándar tradicional y no tradicional

5.2.1.3.1. Ecuación estándar tradicional

5.2.1.3.2. Ecuación estándar no tradicional

5.2.2. Modelos de rodal

5.2.2.1. Ecuaciones de relación volumen total / área basal

5.2.2.2. Ecuación de uso práctico

5.2.2.3. Ecuación de relación de incremento volumétrico / área basal

5.3. Resultados

- 5.3.1. Modelos individuales
 - 5.3.1.1. Ecuaciones locales
 - 5.3.1.2. Ecuaciones locales integradas
 - 5.3.1.3. Ecuación estándar tradicional
 - 5.3.1.4. Ecuación estándar no tradicional
- 5.3.2. Modelos de rodal
 - 5.3.2.1. Ecuaciones de relación volumen total / área basal
 - 5.3.2.2. Ecuación de uso práctico
 - 5.3.2.3. Ecuación de relación de incremento volumétrico / área basal

5.4. Discusión

5.5. Conclusiones particulares

CAPÍTULO VI: Modelo de producción para rodales de *Nothofagus antarctica* bajo dinámica natural.....Pp 111.

6.1. Introducción

Objetivos particulares

6.2. Materiales y métodos

- 6.2.1. Esquema de trabajo y simulaciones
- 6.2.2. Índice de densidad de rodal
- 6.2.3. Modelo de descuento de la altura dominante

6.3. Resultados

6.4. Discusión

6.5. Conclusiones Particulares

CAPÍTULO VII: Conclusiones finales.....Pp 130.

BIBLIOGRAFÍA CITADA.....Pp 133.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....Pp 146.

ANEXO.....Pp 152.

CAPÍTULO I

Introducción general

1.1. Los bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur:

Los bosques Andino-Patagónicos son los ecosistemas forestales con el mejor estado de conservación en la Argentina (Mittermeier et al., 2003; Donoso, 2006). En la Patagonia Argentina los bosques de *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted, comúnmente llamado ñire, ocupan 751.000 hectáreas extendiéndose desde la provincia de Neuquén (33° S) hasta el canal Beagle (55° S) (SAyDSN, 2005). Del total de esa superficie, 303 mil hectáreas se encuentran ubicadas en Patagonia Sur (101 mil ha en la provincia de Santa Cruz y 202 mil en Tierra del Fuego) (Figura 1.1). En Patagonia Sur, el ñire se encuentra formando bosques puros, o acompañando los bosques de *N. pumilio* (Poepp. et Endel.) Krasser (lenga) en forma marginal limitando con el pastizal, en los bordes de los turbales y los arroyos (Premoli, 1991; Frangi et al., 2004). En Tierra del Fuego estos bosques ocupan una franja al norte de los bosques de *N. pumilio* formando un ecotono entre estos bosques y la estepa. Mientras que en Santa Cruz, los ñirantales se desarrollan al este de los bosques de lenga, constituyendo también, el ecotono bosque de lenga-estepa.

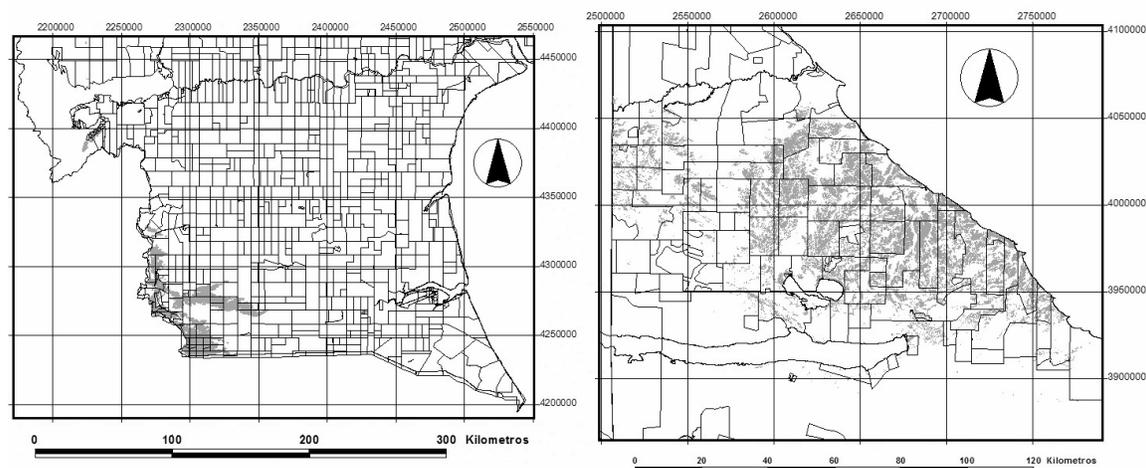


Figura 1.1. Distribución de los bosques de *Nothofagus antarctica* y establecimientos rurales en las provincias de Santa Cruz y Tierra del Fuego.

De las especies forestales patagónicas, *N. antarctica* es considerada la de mayor amplitud ecológica (Donoso, 2006), desarrollándose en una amplia diversidad de

ambientes, desde el nivel del mar en el límite sur de su distribución, hasta alcanzar los 2000 m.s.n.m. en su límite norte continental (Moore, 1983; Frangi et al., 2004). Suele crecer, tanto en suelos delgados, rocosos y áridos, como en suelos que permanecen anegados durante gran parte del año (suelos de mallines y ñadis) (Veblen et al., 1977). El ñire puede considerarse una especie pionera, ya que al igual que otros *Nothofagus* es intolerante a la sombra y posee cierta adaptabilidad a las condiciones de campo abierto (Donoso et al., 1993). Su propagación puede ser por semilla (Soler Esteban et al., 2012), pero también por reproducción vegetativa (raíz, tocón y acodo) (Veblen et al., 1996). De acuerdo al ambiente en el que el ñire se desarrolle es posible reconocer tres morfotipos diferentes (Ramírez et al., 1985) (Figura 1.2): el morfotipo arborescente, que crece en las condiciones más favorables para la especie; el morfotipo arbustivo o achaparrado que es típico de los krummholz y propios de condiciones muy rigurosas, secas y rocosas; y el morfotipo camefítico, de pequeño tamaño y propio de turberas, condiciones de extrema humedad y alto contenido de materia orgánica (Donoso, 2006). En esta tesis, solo se considerará al morfotipo arborescente que es el más abundante en Patagonia Sur.

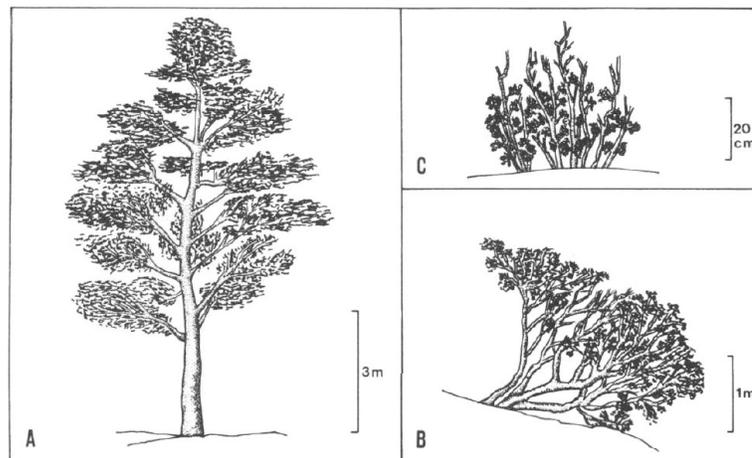


Figura 1.2. Representación esquemática del cuerpo vegetativo aéreo de los tres tipos morfológicos de *Nothofagus antarctica*. A: morfotipo arborescente; B: morfotipo arbustivo achaparrado; C: morfotipo camefítico de turbera (Ramírez et al., 1985).

La estructura y la dinámica de los bosques de *N. antarctica* están asociadas tanto a disturbios de gran escala, que originan el reemplazo de todos árboles del rodal, así como a la caída de árboles individuales a través de una dinámica de claros o “gaps” de pequeña escala. Esta dinámica de formación de claros origina un bosque irregular, multietáneo, formado por bosquetes de estructura interna regular o coetánea (Martínez Pastur & Fernández, 1994). Mientras que los disturbios de gran escala dan origen a bosques regulares coetáneos de mayor superficie (Figura 1.3).

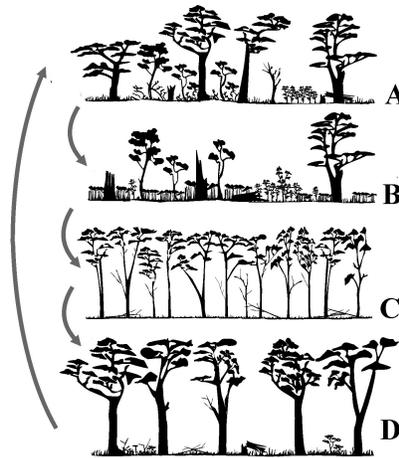


Figura 1.3. Dinámica natural en bosques de *Nothofagus antarctica*. A: fase de desmoronamiento; B: fase de desmoronamiento con regeneración avanzada; C: fase de crecimiento óptimo; D: fase de envejecimiento (Soler Esteban, 2012).

1.2. Uso histórico y propuestas de manejo

Históricamente, los bosques de *N. antarctica* fueron relegados del uso forestal por ser considerados de baja productividad. Esta baja productividad se atribuye principalmente a su lento crecimiento (Premoli & Vidal, 2004), a la forma retorcida de los fustes y a la mala sanidad que frecuentemente presentan (Alvarado Ojeda, 2006). Es por ello que en Patagonia Sur, el aprovechamiento forestal se ha basado históricamente en el procesamiento de la madera de *N. pumilio* (Gea et al., 2004), pero al presente, la disponibilidad de estos bosques es muy limitada, estando el sector forestal en una situación de insostenibilidad ya que se aprovecha más bosque de lo que estima la posibilidad forestal (Martínez Pastur et al., 2004).

Debido a lo anterior, el ñire es una especie de gran importancia económica para la región, por su ubicación y distribución, ocupando los sectores donde se realizan gran parte de las actividades agropecuarias de Patagonia Sur (Peri et al., 2005b) (Figura 1.1). Cabe destacar que en Patagonia Sur existen 97 estancias que poseen bosque de ñire (55 establecimientos en Santa Cruz y 42 en Tierra del Fuego), de las cuales un 68% tiene más del 10% de su superficie ocupada con bosque de ñire (Ormaechea et al., 2009).

La importancia de los bosques nativos de ñire como sistemas silvopastoriles radica principalmente en la capacidad productiva ganadera y la posibilidad de obtener productos madereros provenientes de las intervenciones silvícolas intermedias. La prácticas de los raleos en el marco de un manejo silvopastoril podrían constituirse en intervenciones de características sinérgicas, si ello implica mejorar el crecimiento de los árboles remanentes,

favorecer la regeneración natural, y a la vez mejorar la producción de forraje y el uso por parte de los animales de la cubierta forestal para la protección en invierno.

Al presente, para Patagonia Sur, se cuenta con una propuesta de manejo silvopastoril (Peri et al., 2009). Dicha propuesta comprende un plan de manejo que incluye un inventario forestal para determinar las variables biométricas y geográficas de los bosques de ñire que se incluirán en el sistema silvopastoril. Con la información generada a partir del inventario se elabora el plan de manejo que incluye la información de base y la planificación de las actividades silvícolas. La propuesta de manejo silvopastoril también comprende una evaluación de los pastizales previa y posterior a las intervenciones silvícolas que permitirá la planificación del pastoreo (ajuste de la carga animal). Las intervenciones silvícolas consisten en la práctica de raleos (Figura 1.4). La intensidad de dichos raleos esta definida principalmente por la condición hídrica del rodal a ralear. En sitios con estrés hídricos severos (alturas dominantes de 5 a 8 m), se recomiendan raleos moderados dejando una cobertura remanente de copas entre 50% y 60%. De esta manera se puede obtener un aumento en la producción de pasturas de $300 \pm 150 \text{ Kg MS.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ partiendo de un bosque cerrado con 80-90% de cobertura. Mientras que en sitios con regímenes de precipitación mas favorables, donde la altura dominante supera los 8 m, se recomiendan raleos de mayor intensidad dejando un 30-40% de cobertura remanente de copas. Este tipo de intervención determinaría un aumento de $1400 \pm 250 \text{ Kg MS.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ partiendo de un bosque cerrado con 80-90% cobertura. Actualmente, el 70% de los bosques de ñire se encuentra bajo uso silvopastoril (Peri, 2005; Peri et al., 2006), pero sin la aplicación de planes de manejo que contemplen los criterios de la sustentabilidad. La corta se realiza en forma de raleos o floreos (cortas selectivas) que bajen la cobertura, y de esta forma aumenta la producción de forraje que es aprovechado para el pastoreo de los animales (Peri et al., 2006). La madera de ñire se aprovecha principalmente para postes, varas y leña, con producciones que fluctúan desde 64 a $186 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ según la calidad de sitio para bosques raleados hasta una cobertura remanente del 40% (Peri et al., 2005a).

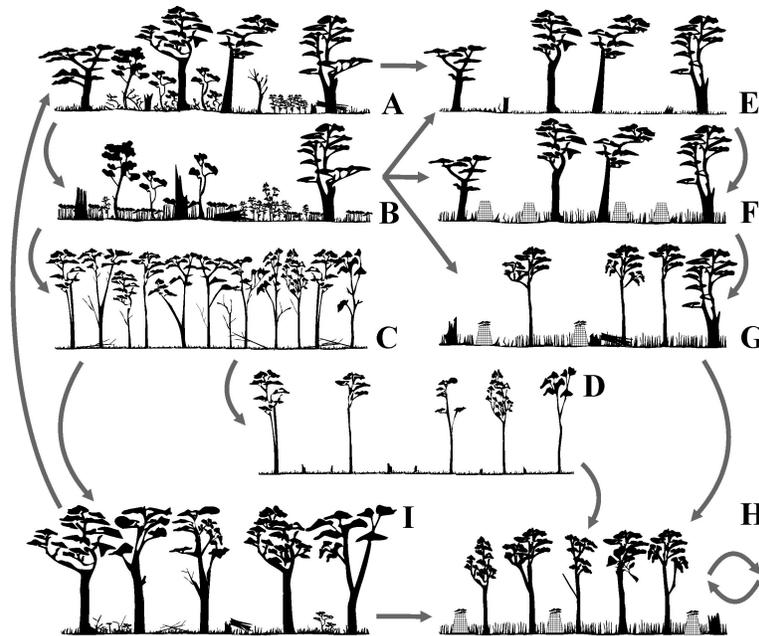


Figura 1.4. Dinámica natural y propuesta de manejo silvícola para bosques de *Nothofagus antarctica*: A: fase de desmoronamiento; B: fase de desmoronamiento con regeneración avanzada; C: fase de crecimiento óptimo; D: fase de envejecimiento; E: intervenciones con cobertura de árboles originales; F: intervenciones con protección de renovales y cobertura de árboles originales; G: intervenciones con cobertura mixta de árboles originales y secundarios; H: bosque secundario con raleo y poda; I: bosque manejado con cobertura de árboles secundarios (Soler Esteban, 2012).

1.3. Biometría forestal

Los estudios biométricos forestales son la base para el desarrollo de modelos, los cuales son necesarios para conocer la estructura de los bosques, tanto en el presente, como en el pasado o en el futuro. Los modelos biométricos como herramientas de predicción son indispensables para la correcta planificación del manejo forestal. Los modelos dendrométricos relacionados a la productividad son eficaces para definir el potencial de un sitio, analizar el funcionamiento de los ecosistemas forestales (McDill & Amateis, 1992) y para planificar el manejo forestal (Gregoire, 1993). En las últimas décadas, con el uso generalizado de las computadoras, el desarrollo de modelos se ha ido complejizando (Vanclay, 1994). Esta mayor complejidad de los modelos se debe principalmente a la incorporación de una mayor cantidad de variables que tratan de explicar los innumerables factores que influyen sobre la biometría de los árboles. Debido a que la aplicabilidad de los modelos se halla condicionada por su facilidad de uso y por los recursos disponibles para la obtención de sus datos (Zeide, 1993), el desafío de los modeladores consiste en aislar una

pequeña cantidad de variables que permitan predecir con un grado aceptable de precisión la variable dependiente que se quiere modelizar (Martínez Pastur et al., 2008a). Estas variables deben ser de simple medición e interpretación, debiendo adaptarse a un amplio rango de condiciones de rodal (García, 1988; Vanclay, 1994). Una característica importante que deben poseer los modelos biométricos es el adecuado comportamiento biológico. Entendiendo por este, una correspondencia entre la modelación matemática desarrollada y la dinámica que presentan los bosques en la naturaleza. Hasta el momento son escasos los trabajos publicados vinculados a la biometría de *N. antarctica* en toda la región Patagónica (Argentina y Chile). Y en general, la bibliografía existente no es compatible entre sí o incluyen un solo factor de influencia en su análisis (e.g., calidad de sitio o edad). En las últimas décadas se han desarrollado, con mayor o menor grado de fragmentación, diferentes estudios relacionados a la biometría de los bosques de *N. antarctica*. Se ajustaron modelos de crecimiento diamétrico (Martínez Pastur et al., 1995; 1997), ecuaciones locales de volumen (Fernández et al., 1995; Reque et al., 2007; Gyenge et al., 2009), ecuaciones estándar de volumen (Martínez Pastur et al., 1995, Lencinas et al., 2002). Se realizaron análisis de la estructura y dinámica forestal (Armesto et al., 1992; Manacorda & Bonvissuto, 1993; Reque et al., 2007) y estudios en ensayos de raleos en las provincias de Río Negro (Sarasola et al., 2008) y Santa Cruz (Peri et al., 2012).

En el transcurso del presente trabajo de tesis se han realizado diversas publicaciones vinculadas a diferentes aspectos de la biometría de los bosques de *N. antarctica*. Entre ellas se incluye: (i) el desarrollo de un modelo de crecimiento de la altura dominante para la determinación de una nueva clasificación de índices de sitio (Ivancich et al., 2011); (ii) un índice de densidad de rodal que permite establecer la intensidad de raleo necesaria para alcanzar determinada cobertura arbórea (Ivancich et al., 2009); (iii) un modelo de crecimiento a nivel rodal (Ivancich et al., 2010a); (iv) un análisis de la respuesta de un rodal de *N. antarctica* a la aplicación de raleos de diferente intensidad basado en el crecimiento diamétrico y en el cierre del canopy (Ivancich et al., 2010b; 2012); (v) y un modelo de crecimiento diamétrico para diferentes calidades de sitio y clases sociales (Ivancich et al., 2010c). Gran parte de los análisis publicados fueron incorporados en los diferentes capítulos que integran la presente tesis.

La explicación de la variación de las variables biométricas a los largo de diferentes factores (e.g., gradientes de calidad de sitio, de clases sociales o de edad) es indispensable al tratar de estimar las distintas variables dasométricas tanto a nivel individual como a nivel rodal. Si bien estos aspectos han sido ampliamente estudiados para otros bosques (Nord-Larsen, 2006; Martínez Pastur et al., 2008a; Bravo et al., 2011; Shater et al., 2011), en *N. antarctica* no se ha abordado el tema de una manera integral, contando hasta el momento solo con aportes individuales con escaso grado de compatibilidad entre sí. Los estudios

realizados en la presente tesis se centran en bosques naturales de *N. antarctica*, libres de manejo forestal intensivo (ni raleos silvopastoriles, ni raleos en estructuras juveniles). Dichos estudios contribuirán a sentar las bases biométricas para bosques bajo dinámica natural y/o post-impacto

1.4. Hipótesis de trabajo

Las diferencias en la estructura forestal del bosque de ñire a lo largo de gradientes de edad y calidad de sitio generan diferencias entre las variables cuali-cuantitativas de sus componentes, influyendo sobre el crecimiento, la dinámica natural y la potencialidad de cosecha de estos bosques. Estas relaciones pueden ser explicadas y predichas a partir de la elaboración de modelos biométricos que incluyan entre sus variables a los componentes de la estructura forestal de mayor variación a lo largo de los gradientes estudiados.

Hipótesis para los modelos biométricos

- Los modelos con mayor número de parámetros presentan mejores ajustes al presentar mejor flexibilidad en el ajuste, en detrimento de la biología del modelo. Se establecen como preguntas de trabajo: (i) La incorporación de un mayor número de parámetros mejora el ajuste de los modelos en ñire?, (ii) el empleo de modelos forzados (e.g., modelos de índice de sitio) mejora el comportamiento biológico en detrimento del ajuste estadístico?. Esta hipótesis se pondrá a prueba en el capítulo II.
- Es posible simplificar los modelos individuales en una única ecuación global que integre gradientes de variación (e.g. calidad de sitio o clase social), generando ajustes comparables a las familias de ecuaciones tradicionales. Se establece como pregunta de trabajo que dicha simplificación favorece a un mejor comportamiento biológico de los modelos. Esta hipótesis se pondrá a prueba en el capítulo IV.
- Las relaciones observadas entre variables biométricas permiten la sustitución de las mismas en los modelos, sin generar una pérdida de ajuste o un deficiente comportamiento biológico del modelo. Se establece como pregunta de trabajo, que en el cálculo del volumen es posible sustituir variables de difícil medición por otras de fácil estimación, tanto a nivel individual como de rodal (e.g., calidad de sitio del

rodal en lugar de la altura total individual). Dicha hipótesis se pondrá a prueba en el capítulo V.

- Los procesos y factores que determinan la dinámica del bosque de ñire sigue patrones simples y predecibles que pueden ser modelizados a partir de variables biométricas de fácil medición. Se establece como pregunta de trabajo, si es posible combinar en un modelo único de producción a ecuaciones de árboles individuales y de rodal, obteniendo una respuesta favorable equilibrada entre ajuste estadístico y ajuste biológico de los resultados. Dicha hipótesis se pondrá a prueba en el capítulo VI.

1.5. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis es determinar relaciones entre variables de estructura forestal y productividad del bosque de *N. antarctica*, para sentar pautas de manejo silvícola a los fines de maximizar la producción en el marco de la sustentabilidad del recurso. A partir de estas relaciones se determinarán los factores más influyentes a nivel individual y de rodal, modelizando la respuesta en gradientes de edad y de calidad de sitio.

CAPÍTULO II

Crecimiento en altura; Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio.

2.1. Introducción

Para una correcta planificación del manejo forestal es necesario contar con herramientas precisas de predicción. Los modelos dendrométricos relacionados con la productividad son eficaces para definir el potencial de un sitio, analizar el funcionamiento de los ecosistemas forestales (McDill & Amateis, 1992) y para planificar el manejo forestal (Gregoire, 1993). El potencial de producción de un rodal puede definirse a través de la calidad de sitio, el cual depende de la combinación de factores físicos y biológicos de una localización geográfica particular (Skovsgaard & Vanclay, 2008). En el caso de los bosques de *Nothofagus antarctica*, la calidad de sitio se encuentra en estrecha relación con una combinación de factores del ambiente: suelo (profundidad y disponibilidad y contenido de nutrientes), régimen hídrico (pendiente, exposición, evapotranspiración) y temperatura, entre otros. Debido a esto, los bosques de ñire pueden alcanzar alturas dominantes de cuatro a 18 metros. Una forma indirecta de medir la calidad de sitio es a través del desarrollo de ecuaciones de índice de sitio (IS) (Monserud, 1984), definido como la altura promedio de los árboles dominantes de un rodal no disturbado, coetáneo y adecuadamente denso a una edad base o de referencia (Thrower, 1989). Dicho índice se basa en dos supuestos: (i) que el crecimiento en altura depende en gran medida de la calidad de sitio, y que es independiente de la densidad; y (ii) que el crecimiento en altura es asintótico a lo largo del tiempo, alcanzando un máximo que es definido por la calidad de sitio (Sturtevant & Seagle, 2004).

Las ecuaciones de índice de sitio pueden ser de tipo anamórfico o polimórfico. En los sistemas de curvas anamórficas la forma de las curvas de crecimiento en altura son iguales para todas las calidades de sitio. Esta condición no está impuesta en los sistemas de curvas polimórficas donde la forma de las curvas de crecimiento de la altura varía de acuerdo con la edad para cada calidad de sitio en particular (Trincado et al., 2002). Generalmente en los estudios de crecimiento biológico, y específicamente en aquellos utilizados para la construcción de curvas de índice de sitio, se recomiendan aquellas ecuaciones que denoten curvas polimórficas en su estructura (García, 1983), debido a que estas se elaboran sin considerar una constante al parámetro de la asíntota (Esse et al., 2007). A su vez las ecuaciones polimórficas pueden dividirse en forzadas o no forzadas de acuerdo a las variables de ajuste que incluyen en su composición (Payandeh & Wang, 1994; Wang &

Payandeh, 1994a). Las ecuaciones forzadas producen curvas que predicen una altura a la edad base coincidente al índice de sitio, mientras que las ecuaciones no forzadas predicen alturas a la edad base que difieren del índice de sitio.

Otra característica a considerar en la construcción de los modelos de crecimiento en altura es la elección de la edad base. La edad base es elegida arbitrariamente y no posee una significancia biológica especial (Thrower, 1989), pero influye en el ajuste de los modelos. En bosques templados suelen utilizarse edades base de 25 a 100 años (Thrower & Goudie, 1992; Martínez Pastur et al., 1997; Splechtna, 2001; Sturtevant & Seagle, 2004; Upadhyay et al., 2005).

El concepto de índice de sitio ha sido desarrollado principalmente para ser aplicado en plantaciones coetáneas monoespecíficas (Clutter et al., 1983). Sin embargo la dinámica simple de los bosques nativos del género *Nothofagus* (Donoso, 2006) que forman bosques puros y dan origen a rodales homogéneos, permite que el concepto de índice de sitio sea utilizado en ellos (Martínez Pastur et al., 1997; Trincado et al., 2002; Salas & García, 2006; Esse et al., 2007). Se han desarrollado ecuaciones para bosques de *Nothofagus pumilio*, *N. dombeyi* (Mirb.) Oerst., *N. obliqua* (Mirb.) Oerst. y *N. alpina* Bird. Egefam., tanto anamórficas como polimórficas así como del tipo forzado y no forzado empleando edades base de 20 a 60 años. Para el caso particular de *N. antarctica*, solo se publicó una clasificación preliminar de calidades de sitio a partir de la altura dominante de rodales en fases de crecimiento avanzadas (Lencinas et al., 2002), sin haberse desarrollado ecuaciones de índice de sitio. En dicha clasificación se estableció un rango de alturas dominantes para rodales adultos que va desde alturas menores a 6 m hasta más de 12 m. El uso de modelos de índice de sitio apropiados para la especie mejora los cálculos de posibilidad de cosecha (Thrower, 1989), así como también permiten obtener estimaciones de volumen más precisas que constituyen información indispensable para la planificación de un correcto manejo forestal. Pero no existe en la bibliografía una clara discusión de cómo influyen los distintos modelos y parámetros en el ajuste de este tipo de ecuaciones. Debido a esto, la evaluación de este tipo de modelos, para la cual existe escasa o nula información, brindará información valiosa a los administradores de este recurso forestal.

Objetivos particulares

El objetivo del presente capítulo es comparar el ajuste de ecuaciones de índice de sitio forzadas y no forzadas con diferentes edades base mediante validaciones a lo largo de gradientes de edades y clases de sitio en bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1 Muestreo

Se muestrearon 72 árboles dominantes en bosques primarios y secundarios de ñire en Tierra del Fuego y Santa Cruz, Argentina (estancia Los Cerros 54° 22' 18" S, 67° 51' 08" O; estancia Stag River 51° 38' 60" S, 72° 01' 00" O y estancia La Suerte 49° 08' 49" S, 72° 58' 03" O). Los rodales seleccionados fueron puros, coetáneos y de densidad completa. Los muestreos se limitaron a los bosques de morfotipo arborescente (Donoso, 2006), excluyendo el resto de los morfotipos (arbustivo o achaparrado, caméfito o postrado) propios de ambientes más rigurosos (Ramírez et al., 1985). Se seleccionaron árboles dominantes con buena sanidad externa y sin daños evidentes en la copa o el fuste, los que fueron apeados para la toma de las muestras. Del fuste principal de cada individuo se extrajeron rodajas a los 1,3 m, 2,0 m y a intervalos de un metro hasta alcanzar la altura total del individuo. En dichas rodajas se realizó la lectura de anillos para la obtención de pares de datos altura-edad. A la base de datos obtenida se le adicionaron 47 mediciones puntuales de individuos dominantes a los que se les determinó la edad a partir de mediciones de barreno. Obteniéndose un total de 653 pares de datos altura-edad (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Conjunto de datos para la modelación del crecimiento en altura de *N. antarctica*.

	Edad (años)	Altura (m)
Promedio	62,2	7,2
Máximo	259	15,8
Mínimo	0	1,3
Desvío estándar	51,9	3,3
N	653	653

2.2.2 Análisis de la muestra

A cada árbol se le calculó un índice de sitio para las tres edades bases ensayadas (30, 40 y 50 años) mediante interpolaciones entre las mediciones sucesivas. Se consideró como edad cero a la medida a 1,3 m del suelo, de modo de disminuir los efectos de factores externos a la calidad de sitio que puedan influir sobre el crecimiento en altura de los árboles en edades tempranas (Thrower, 1989) como, por ejemplo, competencia, ramoneo de guanaco (*Lama guanicoe*, Camelidae), liebre doméstica (*Lepus europeaus*, Lagomorpha) o ganado doméstico (Martínez Pastur et al., 1999, Pulido et al., 2000). Esta misma metodología fue utilizada por otros autores para bosques de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Pinus ponderosa* (Dougl.) Laws (Monserud, 1984; Waring et al., 2006) de modo de disminuir la variabilidad asociada al periodo inicial de establecimiento.

2.2.3. Selección de modelos

Con los datos obtenidos se ajustaron cuatro funciones de crecimiento en altura (H), donde las variables independientes fueron la edad de los árboles a 1,3 m (t) y el índice de sitio (IS_{ti}) a una edad base determinada (ti), de acuerdo a datos requeridos por las ecuaciones empleadas. Se analizaron dos ecuaciones no forzadas de cinco parámetros: la función de crecimiento de Weibull propuesta por Zeide (1993) [1] y una función basada en la función biológica de crecimiento de Richards [2] (Ek, 1971; Wang & Payandeh, 1994b). Asimismo se escogieron dos ecuaciones forzadas, una de cuatro parámetros propuesta por Goelz & Burk (1992) [3] y una de tres parámetros propuesta por Newnham (1988) [4]. Para el ajuste de los datos, a la variable IS_{ti} se le restó 1,3 m. Esta modificación, empleada por Martínez Pastur *et al.*, (1997) para *Nothofagus pumilio*, es debida a que se considera la edad total del árbol a 1,3 metros de altura.

$$H = (a(IS_{ti} - 1,3)^b (1 - e^{ct^{d(IS_{ti}-1,3)^e}})) + 1,3 \quad [1]$$

$$H = (a(IS_{ti} - 1,3)^b (1 - e^{ct})^{d(IS_{ti}-1,3)^e}) + 1,3 \quad [2]$$

$$H = ((IS_{ti} - 1,3) \left(\frac{1 - \exp\left(-a\left(\frac{IS_{ti}}{ti}\right)^b ti^c t\right)}{1 - \exp\left(-a\left(\frac{IS_{ti}}{ti}\right)^b ti^c ti\right)} \right))^d + 1,3 \quad [3]$$

$$H = (a(IS_{ti} - 1,3)^b (1 - e^{-ct})^f) + 1,3 \quad [4]$$

$$f = \frac{\ln\left(\frac{(IS_{ti} - 1,3)^{1-b}}{a}\right)}{\ln(1 - e^{-cti})}$$

Donde: H = altura total (m), IS = índice de sitio (m), t = edad (años), ti = edad base (años), ln = logaritmo natural, e = base de los logaritmos neperianos, a-b-c-d-e = parámetros de los modelos. [1]: Weibull, [2]: Richards, [3]: Goelz y Burk, [4]: Newnham.

3.2.4 Ajuste y evaluación de modelos

Las ecuaciones elegidas fueron ajustadas para las tres edades base propuestas (30, 40 y 50 años) obteniendo en total 12 ecuaciones de crecimiento en altura. Todas las

ecuaciones se ajustaron mediante técnicas de regresión no lineal (Gezan et al., 2009) utilizando el algoritmo de Marquardt mediante el programa statgraphics (Statgraphics, 2001). En los últimos años se han publicado diversos trabajos donde se describen las bondades de este tipo de metodologías (modelos no lineales y algoritmo de Marquardt) (e.g. Khamis et al., 2005; Lei & Zhang 2004; Fekedulegn et al., 1999). La evaluación estadística de los modelos se llevó a cabo a través del coeficiente de determinación ajustado (R^2 -aj.) y se evaluó la correlación de errores a partir del coeficiente de Durbin-Watson. También se realizó un análisis de los residuales a partir del error medio de la estimación (EME), el error estándar de la estimación (ESE), el error medio absoluto (EMA), el error medio porcentual ($\% \bar{e}$) y el error medio porcentual en valor absoluto ($\% |\bar{e}|$) de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\text{EME} = ((\sum_{i=1}^n e_i) / n) \quad [5]$$

$$\text{ESE} = \sqrt{((\sum_{i=1}^n e_i)^2 / n)} \quad [6]$$

$$\text{EMA} = ((\sum_{i=1}^n |e_i|) / n) \quad [7]$$

$$\% \bar{e} = ((\sum_{i=1}^n e_i / x_i) / n) \quad [8]$$

$$\% |\bar{e}| = ((\sum_{i=1}^n |e_i / x_i|) / n) \quad [9]$$

Donde: n = número de datos utilizados en el ajuste del modelo, e_i = residuo (valor observado - valor predicho), y x_i = altura observada.

La edad de referencia se definió en base al mejor ajuste estadístico para cada ecuación, basado en los estadísticos de las ecuaciones y el análisis de los residuales. Una vez seleccionada una edad base se realizó una autovalidación de las ecuaciones ajustadas en la que se analizó la distribución porcentual del error medio absoluto, el error medio de la estimación y el error medio porcentual en valor absoluto a lo largo de un gradiente de clases de edades (< 49; 50-99; 100-149; > 150 años) y clases de sitio, las que fueron definidas para cada ecuación, según el IS a la edad base seleccionada. Así mismo, se compararon mediante análisis de varianza ($P < 0,05$) el error medio de la estimación y el error medio porcentual en valor absoluto entre ecuaciones para cada clase de sitio y de edad. Los

límites de cada intervalo de índice de sitio se fijaron dividiendo su rango total en cuatro clases (I, II, III y IV, siendo I la mejor y IV la peor). A partir de la base de datos obtenida y de las ecuaciones de crecimiento en altura dominante ajustados, se conformó una nueva clasificación de calidades de sitio según el índice de sitio a la edad base seleccionada.

2.3. Resultados

Las ecuaciones no forzadas explicaron entre el 89% y el 94% de la variación de la altura dominante. Similarmente, las ecuaciones forzadas explicaron entre el 88% y el 94% de la variación (Tabla 2.2). Los mayores valores del coeficiente de determinación ajustado (R^2 -aj.) de cada ecuación se obtuvieron con la mayor edad base ensayada (50 años), mientras que los peores ajustes se obtuvieron con una edad base de 30 años. La ecuación no forzada [2] fue la que presentó los mayores valores de R^2 -aj. para edades base de 30 y 50 años, mientras que los menores ajustes se obtuvieron con la ecuación [4] a una edad base de 30 años. Comparativamente, entre las dos ecuaciones forzadas, la ecuación de cuatro parámetros [3] presentó coeficientes de determinación levemente mayores que la ecuación de tres parámetros [4] para todas las edades de referencia ensayadas.

Tabla 2.2. Parámetros y estadísticos de los modelos de índice de sitio ajustados para *N. antarctica*.

Tipo de modelo	Ecuación	Edad base (años)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	R^2 -aj.
No forzados	[1]	30	7,3470	0,2694	-0,0139	0,8648	0,1465	89,14
	[1]	40	6,9284	0,2853	-0,0111	0,7954	0,2036	92,27
	[1]	50	7,0429	0,2823	-0,0112	0,8126	0,1642	94,06
	[2]	30	6,1211	0,3865	-0,0211	2,3749	-0,4708	89,59
	[2]	40	5,0663	0,4693	-0,0206	3,4972	-0,6156	92,07
	[2]	50	5,5198	0,4222	-0,0181	3,6200	-0,6069	94,36
Forzados	[3]	30	0,3965	0,8437	-0,3434	1,3367	-	89,42
	[3]	40	0,2089	0,8623	-0,1614	1,2486	-	92,56
	[3]	50	0,2902	0,9936	-0,1643	1,3100	-	94,11
	[4]	30	5,9613	0,3899	-0,0243	-	-	88,14
	[4]	40	4,7707	0,4986	-0,0225	-	-	91,84
	[4]	50	5,3209	0,4428	-0,0197	-	-	93,93

[1]: modelo de Weibull; [2]: modelo de Richards; [3]: modelo forzado de Goelz-Burk; [4]: modelo forzado de Newnham; *a-b-c-d-e* = parámetros de la ecuación; R^2 -aj.= coeficiente de determinación ajustado; “-“ = sin parámetro.

No se detectaron grandes diferencias entre ecuaciones no forzadas y forzadas al analizar la auto-correlación de errores, respecto al coeficiente de Durbin-Watson (Tabla 2.3). Por otra parte, la mayor auto-correlación se observó cuando se utilizó la edad base de 50 años para todas las ecuaciones.

Tabla 2.3. Valores de los coeficientes de Durbin-Watson para los modelos ajustados.

Modelos	Ecuación	Edad base (años)			Promedio
		30	40	50	
No forzados	[1]	1,6537	1,6235	0,6342	1,3038
	[2]	1,6226	1,5838	0,7842	1,3302
Forzados	[3]	1,7136	1,6437	0,6637	1,3403
	[4]	1,6017	1,5476	0,7752	1,3082
Promedio		1,6479	1,5997	0,7143	-

[1]: modelo de Weibull; [2]: modelo de Richards; [3]: modelo forzado de Goelz-Burk; [4]: modelo forzado de Newnham.

En general los errores globales presentaron menores valores para las ecuaciones no forzadas en comparación con las ecuaciones forzadas (Tabla 2.4). El error medio de la estimación varió entre -0,01 m y 0,03 m para las ecuaciones no forzadas, y entre -0,20 m y 0,08 m para las ecuaciones forzadas. El error estándar de la estimación varió de 0,88 m a 1,07 m, y de 0,89 m a 1,09 m para las ecuaciones no forzadas y forzadas, respectivamente. El error medio absoluto varió de 0,66 m a 0,77 m, y de 0,63 m a 0,73 m para las ecuaciones no forzadas y forzadas, respectivamente. Los errores medios porcentuales ($\% \bar{\epsilon}$) variaron de 2% a 5%, y de 5% a 10% para las ecuaciones no forzadas y forzadas, respectivamente. Y los errores medios porcentuales absolutos ($\% |\bar{\epsilon}|$) variaron de 12% a 15%, y de 13% a 17% para las ecuaciones no forzadas y forzadas, respectivamente. Al analizar los errores de manera global, se puede advertir que para todas las ecuaciones ajustadas, lo menores errores se obtuvieron al utilizar una edad base de 50 años.

Tabla 2.4. Errores medios de los modelos de índice se sitio ajustados para *N. antarctica*.

Tipo de modelo	Ecuación	Edad base (años)	EME (m)	ESE (m)	EMA (m)	%ē (%)	% ē (%)
No forzados	[1]	30	<0,01	1,07	0,77	4,71	15,28
	[1]	40	-0,01	0,92	0,66	1,96	15,02
	[1]	50	-0,02	0,91	0,68	1,82	13,66
	[2]	30	-0,01	1,07	0,76	3,54	12,83
	[2]	40	-0,02	0,93	0,67	2,27	12,54
	[2]	50	-0,03	0,88	0,67	2,55	12,42
Forzados	[3]	30	-0,01	1,07	0,73	8,93	16,90
	[3]	40	-0,07	0,89	0,63	10,26	17,03
	[3]	50	-0,20	0,87	0,67	9,27	15,81
	[4]	30	0,08	1,09	0,76	6,05	13,61
	[4]	40	<0,01	0,95	0,68	6,51	12,91
	[4]	50	-0,06	0,92	0,70	5,33	13,22

[1]: modelo de Weibull; [2]: modelo de Richards; [3]: modelo forzado Goelz-Burk; [4]: modelo forzado de Newnham; EME = error medio de la estimación; ESE = error estándar de la estimación; EMA = error medio absoluto; %ē = error medio porcentual; %|ē| = error medio porcentual en valor absoluto.

En la autovalidación de las ecuaciones, el rango de índice de sitio para una edad base de 50 años (IS_{50}) quedó dividido en las siguientes cuatro clases: sitio I ($IS_{50} > 9,0$ m), sitio II (IS_{50} 7,3 m a 9,0 m), sitio III (IS_{50} 5,5 m a 7,2 m) y sitio IV ($IS_{50} < 5,5$ m). Considerando una edad base de 50 años, la distribución del error medio absoluto por clase de sitio y clase de edad fue equitativa para todas las ecuaciones consideradas (Figura 2.1) ya que en ningún caso la diferencia de error medio absoluto entre la mayor y la menor clase de edad fue superior al 14% mientras que la diferencia entre la menor y mayor clase de sitio no superó el 13%. Por otro lado, no se manifestó una diferenciación evidente entre ecuaciones forzadas y no forzadas. La menor proporción de error medio absoluto se obtuvo en la clase inferior de edad para todos los modelos (18% a 22%) (Figura 2.1A). Estos errores fueron aumentando con la edad, llegando a valores de 29% a 32% en la clase superior (> 150 años). El modelo [1] fue el que presentó la mayor variabilidad del error medio absoluto entre clases de edad con diferencias porcentuales entre la mayor y menor clase del 14%, y el modelo [4] fue el que presentó la menor diferencia (7%). Los porcentajes de error medio absoluto por clases de sitio tendieron a un aumento indirectamente proporcional con la clase considerada para todos los modelos analizados (Figura 2.1B). Las diferencias de porcentaje de error medio absoluto entre la clase de sitio superior e inferior para las ecuaciones no forzadas fueron del 12%, mientras que para las ecuaciones forzadas dicha diferencia varió entre el 10% y el 13%.

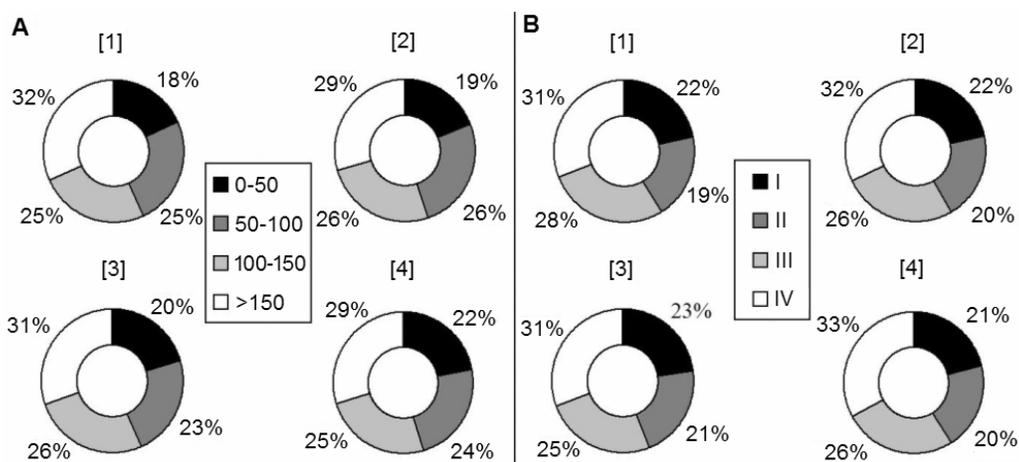


Figura 2.1. Comparación de los errores globales absolutos de cada modelo ensayado por clase de sitio (A) y por clase de edad (B) utilizando una edad base de 50 años. [1]: modelo de Weibull; [2]: modelo de Richards; [3]: modelo forzado Goelz-Burk; [4]: modelo forzado de Newnham.

Para la mejor clase de sitio (I) las ecuaciones [2] y [4] presentaron un error medio de la estimación significativamente superiores ($P < 0,05$) al resto de las ecuaciones (Figura 2.2A). En las clases de sitio intermedias (II y III) las ecuaciones no forzadas presentaron valores sobreestimados, mientras que las ecuaciones forzadas subestimaron las alturas en ambas clases de sitio. En la clase de sitio IV las ecuaciones forzadas [3] y [4] subestimaron diferenciándose significativamente de la ecuación no forzada [4], mientras que la ecuación [2] subestimó levemente sin diferenciarse significativamente del resto de las ecuaciones. Al analizar la distribución del error medio de la estimación por clases de edades (Figura 2.2B), los valores fueron positivos en las primeras tres clases de edades (< 150 años) para las ecuaciones no forzadas, y negativos para la clase de edad superior (> 150 años). Por otro lado, las ecuaciones forzadas tuvieron un patrón de distribución de errores diferente a las de las ecuaciones no forzadas, donde el modelo [3] subestimó en todas las clases de edades, y donde la ecuación de Newnham [4] sobreestimó en las clases de edad intermedias y subestimó en el resto de las clases (< 50 años y > 150 años).

Los errores medios porcentuales en valor absoluto ($\%|\bar{\epsilon}|$) no se diferenciaron significativamente entre ecuaciones para las clases de sitio superiores, pero en la clase de sitio IV (Figura 2.2C) de la ecuación [4] fue significativamente mayor al de las ecuaciones [1] y [3]. Mientras que la ecuación [2] no se diferenció significativamente del resto de las ecuaciones. Para todas las ecuaciones, los menores errores medios porcentuales en valor absoluto se encontraron en la clase II (9,0%; 9,0%; 9,2% y 9,2% para las ecuaciones [1] a [4], respectivamente), mientras que los mayores valores se observaron en la clase IV

(13,2%; 15,0%; 13,6% y 17,0% para las ecuaciones [1] a [4], respectivamente). Los mayores errores medios porcentuales en valor absoluto se encontraron en la clase de edad más joven (< 50 años) para todas las ecuaciones (Figura 2.2D), disminuyendo progresivamente hacia la clase de edad superior. En la clase de edad inferior la ecuación [4] presentó un error medio porcentual en valor absoluto (16,7%) significativamente mayor al de la ecuación [1] (13,0%), mientras que para el resto de las clases no hubo diferencias significativas con valores entre 10,2% y 8,4% para la segunda clase de edad (50-100 años), entre 8,7% y 8,2% para la tercer clase de edad (100-150 años) y entre 8,6% y 7,7% para la clase de edad superior (> 150 años).

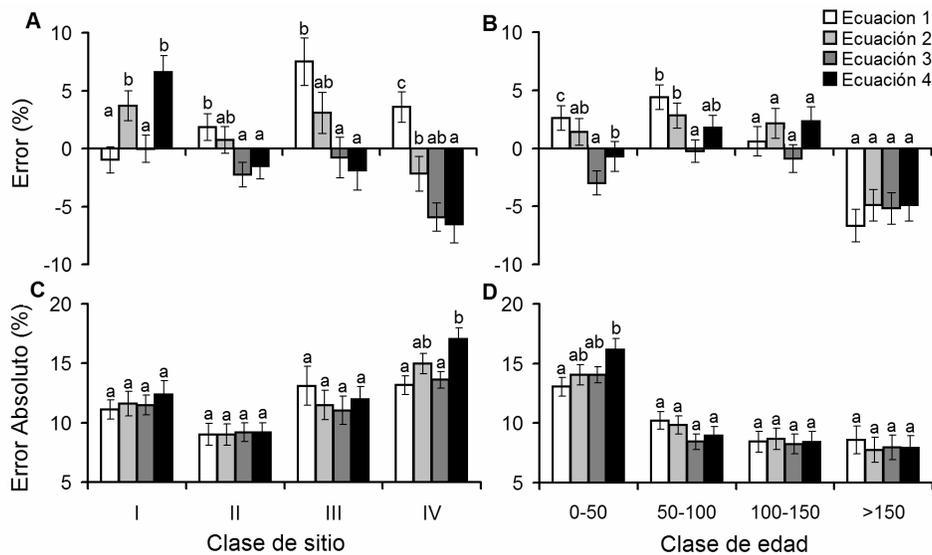


Figura 2.2. Errores medios porcentuales de la estimación (EME) por modelo de índice de sitio discriminado por clases de sitio (A) y clases de edad (B), y errores medios porcentuales en valor absoluto ($|\bar{\epsilon}|$) por modelo de índice de sitio discriminado por clases de sitio (C) y clases de edad (D) para una edad base de 50 años. Letras diferentes indican diferencias significativas a $P < 0,05$ entre ecuaciones dentro de cada clase de sitio y edad. Ecuación 1: modelo de Weibull; Ecuación 2: modelo de Richards; Ecuación 3: modelo forzado de Goelz-Burk; Ecuación 4: modelo forzado de Newnham.

En las curvas de crecimiento acumulado (Figura 2.3) se puede advertir que la tasa de crecimiento en altura es mayor durante los primeros 70 años para una clase de sitio I ($IS_{50} > 9,7$ m), y va retrasándose paulatinamente hacia la clase de sitio V (IS_{50} entre 2,5 y 3,6 m). Al llegar a edades avanzadas, los árboles ya alcanzaron una altura máxima y no modifican la altura total. Este comportamiento se observó en las mejores clases de sitio de todas las ecuaciones analizadas, pero solo se cumplió en las clases de sitio inferior para la

ecuación no forzada de Richards [2] y la ecuación forzada de Newnham [4] (Figuras 2.3B y 2.3D), mientras que en la ecuación no forzada de Weibull [1] y la ecuación forzada de Goelz y Burk [3] las curvas no alcanzaron a formar una asíntota. Por otro lado, en la ecuación no forzada de Richards [2] y la ecuación forzada de Newnham [4] se observó para el menor índice de sitio ($IS_{50} = 3,6$ m) que durante los primeros años casi no hubo crecimiento en altura.

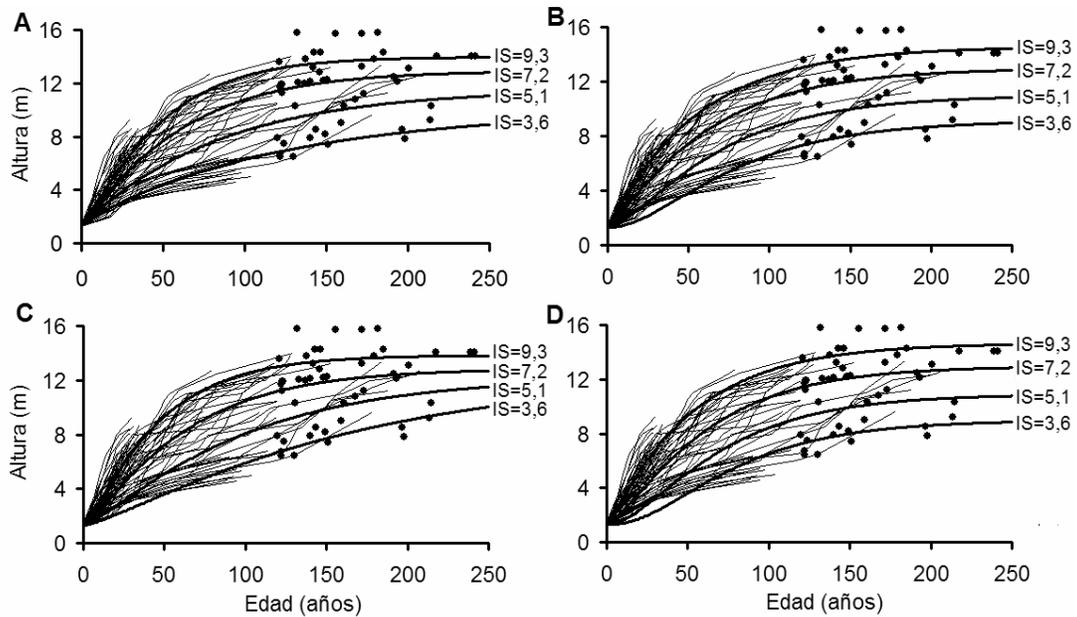


Figura 2.3. Conjunto de datos y curvas de crecimiento acumulado en altura. A: modelo de Weibull; B: modelo de Richards; C: modelo forzado Goelz-Burk; D: modelo forzado de Newnham; IS = índice de sitio.

El incremento medio anual fue superior en las mejores clases de sitio para todas las ecuaciones durante los primeros 70 años aproximadamente (Figura 2.4). A partir de los 70 años la ecuación no forzada de Weibull [1] y la ecuación forzada de Goelz y Burk [3] mostraron menores incrementos medios anuales en las clases de sitio superiores comparados con las clases inferiores (Figuras 2.4A y 2.4C). Por otra parte, la ecuación no forzada de Richards [2] y la ecuación forzada de Newnham [4] presentaron niveles similares de incremento medio anual para todas las clases de sitio una vez alcanzada la edad de 70 años (Figuras 2.4B y 2.4D). En las ecuaciones [2] y [4], el incremento medio anual máximo se produjo primero en la mejor calidad de sitio ($IS_{50} = 9,3$ m) retrasándose dicho máximo hacia edades más tardías en las clases de sitio inferiores. Este comportamiento no fue observado en las ecuaciones [1] y [3].

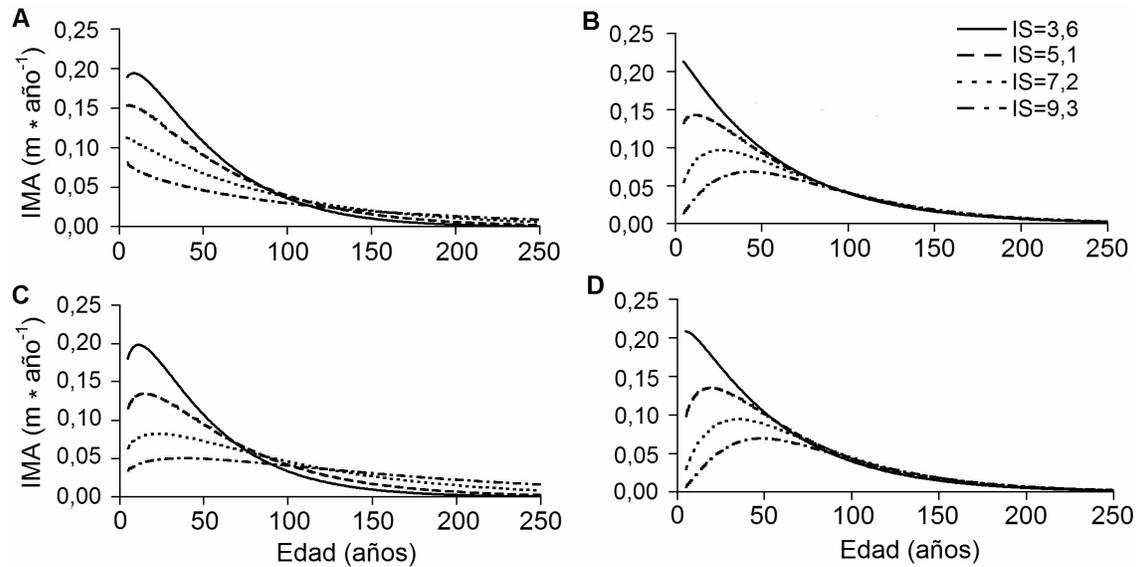


Figura 2.4. Curvas de incremento medio anual en altura (IMA). A: modelo de Weibull; B: modelo de Richards; C: modelo forzado Goelz-Burk; D: modelo forzado de Newnham; IS = índice de sitio.

Al analizar los errores puntuales que produjeron los modelos a la edad de 50 años, se observó que la ecuación [1] presentó desviaciones de 0,81 m para un índice de sitio de 3,6 m, de 0,77 m para un índice de sitio de 5,1 m, 0,35 m para un índice de sitio de 7,2 m y 0,07 m para un índice de sitio de 9,3 m. La ecuación [2], para los mismos índices de sitio, presentó desvíos de 0,23 m, 0,40 m, 0,26 m y 0,20 m, respectivamente. Mientras que las ecuaciones [3] y [4] al ser forzadas no presentaron desvíos a la edad de 50 años.

A partir de la comparación entre las cuatro ecuaciones ensayadas se seleccionó la ecuación forzada de Newnham [4] para la construcción de una clasificación de clases de sitio. De las otras funciones, la ecuación de Goelz y Burk se descartó por presentar un error medio de la estimación y un error medio porcentual en valor absoluto global muy elevados (Tabla 2.4). La ecuación [1] se descartó debido a los errores puntuales que presentó a los 50 años de edad. La ecuación [2], si bien presenta estadísticos comparables a los de las ecuaciones [1] y [4] y las formas de las curvas son similares a las de la ecuación [4], no fue considerada debido a presentar errores puntuales a la edad de 50 que no están presentes en la ecuación [4].

Utilizando la ecuación de Newnham [4], quedó definida la siguiente clasificación de clases de sitio (S) según el IS_{50} y la altura dominante (HD) a la que arribaría un rodal a una edad mayor a los 150 años.

- S I: $IS_{50} > 9,3$ m; HD $> 14,0$ m
- S II: $IS_{50} 7,2 - 9,3$ m; HD 12,0 - 14,0 m

- S III: IS₅₀ 5,1 - 7,2 m; HD 10,0 - 11,9 m
- S IV: IS₅₀ 3,6 - 5,1 m; HD 8,0 - 9,9 m
- S V: IS₅₀ < 3,6 m; HD < 8,0 m

2.4. Discusión

Los valores provenientes de la autovalidación de las ecuaciones ajustadas son comparables a los encontrados por otros autores que trabajaron con curvas de índice de sitio aplicadas a bosques de *Nothofagus spp.* Los coeficientes de determinación (R²-aj.) calculados en este trabajo son similares al determinado por Martínez Pastur et al. (1997) quienes obtuvieron un R²-aj. de 94,4 utilizando la función de índice de sitio forzada de Weibull de tres parámetros con datos de *N. pumilio*.

Como fue presentado en los resultados, dentro de una misma edad base los modelos de 4 y 5 parámetros muestran R²-aj. levemente mayores que los modelos generados con la ecuación de tres parámetros [4]. A su vez, se obtienen mayores valores de R²-aj. en las ecuaciones no forzadas con respecto a las forzadas, que pueden estar relacionados a una mayor plasticidad de estas ecuaciones. Los valores del coeficiente de Durbin-Watson indican que las ecuaciones para las edades base de 30 y 40 años no presentarían correlación de errores, mientras que en los casos en que se usó la edad base de 50 años posiblemente exista dicha correlación.

Las auto-validaciones de los modelos pueden conducir a conclusiones erróneas, dado que los supuestos de los modelos estadísticos no son confirmados con una muestra independiente. No obstante, la autovalidación brinda una primera impresión de cuán efectivo puede ser un modelo a lo largo de diferentes gradientes analizados. Sin embargo, es recomendable, en las aplicaciones realizadas por potenciales usuarios, la realización de validaciones independientes para confirmar el ajuste de las estimaciones (Vanclay, 1994).

Los errores medios de la estimación obtenidos en este trabajo, para todas las ecuaciones excepto la ecuación [3], son similares a los encontrados para *N. pumilio* (0,007 m) (Martínez Pastur et al., 1997). La obtención de bajos valores de error medio de la estimación es debida a que los errores positivos se compensan con los negativos, dando, para las ecuaciones [1], [2] y [4], un promedio cercano a cero. Por otro lado, los valores de ESE son menores a los calculados por Martínez Pastur et al., (1997) (1,64 m) para *N. pumilio*, y levemente mayores a los calculados por Trincado et al., (2002) para *N. obliqua* y *N. alpina* (0,52 m y 0,39 m, respectivamente), que generaron curvas polimórficas con una edad base de 20 años utilizando la ecuación de Cieszewski-Bella. Los errores medios porcentuales en valor absoluto (%|ē|) calculados en este trabajo son levemente mayores a

los calculados por Esse et al., (2007) a partir de la ecuación de índice de sitio de Chapman-Richards, con una edad base de 40 años para bosques de *N. dombeyi*.

El uso de ecuaciones forzadas evita la ocurrencia de errores ambiguos, por cuanto la altura predicha a la edad base es siempre igual a la indicada en el índice de sitio. Tal condición impone un forzamiento artificial sobre la ecuación, lo que resulta por lo general en un menor ajuste (Curtis et al., 1974; Martínez Pastur et al., 1997; Salas & García, 2006). Sin embargo, las ecuaciones ajustadas presentan una mayor lógica en los datos, ya que dichos valores deben ser coincidentes. Por su parte, las ecuaciones no forzadas suelen tener mejores ajustes estadísticos, pero no cumplen con la condición de que la altura a la edad base sea igual al índice de sitio según la definición. Esto puede verse en el presente trabajo al observar que las ecuaciones no forzadas, presentan mejores ajustes globales que las ecuaciones forzadas (Tabla 2.4).

La utilización de una edad de referencia de 50 años permite obtener mejores ajustes globales que con las demás edades (30 y 40 años). Esto es consistente con lo encontrado por otros autores que determinaron que la elección de una edad de referencia cercana a la mitad del turno de corta (que para los bosques de *N. antarctica* podría variar entre 80 y los 120 años, dependiendo del diámetro que se pretenda alcanzar y de la calidad de sitio (ver Capítulo VI)) produce menores errores y crea una distribución mas balanceada de los residuos (Gatzojannis, 2000; Mamo & Sterba, 2006). Según Teshome & Petty (2000) la elección de una edad base muy baja dará resultados severamente sesgados. Según lo citado por Ortega & Montero (1988) la determinación precisa de la edad base es clave porque de lo contrario puede producirse una clasificación errónea de las calidades de sitio. En el presente caso, la mayor edad ensayada resulta la más adecuada, no pudiendo determinarse si una edad mayor podría arrojar mejores ajustes.

Muchas veces un modelo puede presentar un buen comportamiento general, pero malo en forma particular, sobre todo en los extremos de los rangos considerados (Lencinas et al., 2002). Debido a esto es importante analizar el ajuste de los modelos a lo largo de gradientes de edad y de calidad de sitio, como los ensayados en el presente trabajo. A partir del análisis de la distribución del error medio de la estimación no se puede establecer una clara diferenciación entre el ajuste de las ecuaciones forzadas y las no forzadas a lo largo de los gradientes considerados. Sin embargo, las distribuciones más balanceadas del error medio de la estimación a lo largo de dichos gradientes se obtienen con las ecuaciones [2] y [4]. La distribución del error medio porcentual en valor absoluto es similar para todos los modelos; sin embargo, los elevados valores de este parámetro para la menor clase de edad posiblemente se deban a que a edades tempranas, el crecimiento en altura de un rodal tenga una mayor influencia de otras variables externas a la calidad de sitio en comparación con el crecimiento en altura a edades más avanzadas (Nigh, 1995). Por otra parte, cabe

considerar que más importante que los valores alcanzados por los estadísticos lo es la buena significancia biológica de los modelos (Martínez Pastur et al., 2008a). A partir de las curvas de crecimiento acumulado (Figura 2.3) y de incremento medio anual (Figura 2.4) es posible observar que las ecuaciones de Richards [2] y Newnham [4] cumplen con las condiciones que deben tener las curvas de crecimiento, o sea una pendiente positiva, un punto de inflexión y alcanzar una asíntota que sea paralela al eje de las abscisas (Peschel, 1938). Este comportamiento está definido por la genética de la especie y por las condiciones ambientales donde crece (Klepac, 1983). En el caso de *N. antarctica* la forma de las curvas fue concordante con lo determinado por Donoso (2006) que determinó que estos bosques comienzan a mostrar signos de senescencia entre los 80 y los 120 años de edad. Las ecuaciones [1] y [3] no mostraron un comportamiento armónico propio de esta descripción; por un lado, la ecuación [1] no presentó puntos de inflexión bien definidos para todas las clases de sitio, mientras que en la ecuación [3] las clases de sitio inferiores alcanzaron dicho punto al mismo tiempo o antes que las clases superiores. Por otro lado, las ecuaciones [2] y [4] presentaron la desventaja de que para la calidad de sitio inferior poseen una curva que durante los primeros años casi no muestra crecimiento en altura, lo que no representa a la realidad.

Considerando los resultados analizados, las ecuaciones [1], [2] y [4] muestran los mejores ajustes, tanto en forma particular como general, sin presentar diferencias importantes entre ellos, pero sí con la ecuación [3]. La superioridad de las ecuaciones [2] y [4] también se observa en las características ya mencionadas de las curvas de crecimiento acumuladas y de incremento medio anual. No obstante, las ecuaciones [1] y [2], al ser no forzadas, presentan la desventaja de producir desviaciones, en mayor o menor grado, en la predicción de la altura a la edad base, mientras que la ecuación [4], debido a su condición de forzada, no produce dichas desviaciones. Con base en esto último se considera a la ecuación forzada de Newnham [4] como la más apropiada para los cálculos de índice de sitio en bosques de *N. antarctica*.

A partir del modelo obtenido, se puede observar que *N. antarctica* presenta un crecimiento en altura menor al de otras especies del género *Nothofagus*. *N. dombeyi* puede alcanzar, en los mejores sitios, alturas dominantes de 40 m a una edad de 80 años (Esse et al., 2007). *Nothofagus pumilio*, para la mejor calidad de sitio, alcanza los 30 m de altura a los 115 años de edad (Martínez Pastur et al., 1997). *Nothofagus obliqua*, en la mejor calidad de sitio, alcanza alturas cercanas a los 45 metros a una edad de 100 años (Salas & García, 2006). Mientras que *N. antarctica* alcanza para la mejor calidad de sitio una altura dominante de 14 m a una edad de 150 años. Por otro lado el incremento medio anual máximo en *N. dombeyi*, *N. pumilio* y *N. obliqua*, para las mejores calidades de sitio, es siempre superior al valor máximo de *N. antarctica*. En las mejores calidades de sitio, *N.*

dombeyi, *N. pumilio* y *N. obliqua* presentan incrementos medios anuales máximos, respectivamente, de 0,67, 0,45 y 1,37 m año⁻¹ (Martínez Pastur et al., 1997; Salas & García, 2006; Esse et al., 2007), mientras que *N. antarctica* presenta un máximo de 0,23 m año⁻¹ para la mejor calidad de sitio.

La nueva clasificación de calidad de sitio propuesta, a partir de la ecuación [4] resulta una herramienta práctica para la estimación de la calidad de sitio. Teniendo en cuenta que el crecimiento en altura se estabiliza a una edad aproximada de 150 años (Figura 2.3), el uso dicha clasificación permite estimar la clase de sitio de un rodal adulto (> 150 años) con solo medir la altura dominante. Para rodales más jóvenes será necesario medir la altura dominante y la edad del rodal. Esta clasificación representa una alternativa a la anterior clasificación de clases de sitio presentada para *N. antarctica* por Lencinas et al. (2002). Esta nueva propuesta para la estimación y clasificación de la calidad de sitio, será la utilizada en todos los análisis que se presentarán en los capítulos siguientes de esta tesis.

2.5. Conclusiones particulares

El ajuste de una ecuación, en términos de calidad y comportamiento biológico, no puede ser determinado a priori para una especie en particular, y dependerá de la calidad de los datos obtenidos para el ajuste. En el presente caso, la condición de ecuaciones forzadas o no forzadas, así como la cantidad de parámetros no influyó significativamente. Si bien las ecuaciones forzadas y con menos parámetros presentaron ajustes levemente menores, la magnitud de esta diferencia no impidió que la ecuación forzada de Newnham de tres parámetros sea una herramienta práctica y precisa para estimar altura de un rodal a partir de su edad e IS_{50} . Se consideró más importante en la implementación de un modelo de crecimiento, que éste tuviera un adecuado comportamiento biológico y no produjera errores o ambigüedades, a que se obtuviera un mejor ajuste estadístico. Es por ello que se recomienda el uso de la ecuación forzada de Newnham como una herramienta precisa de predicción en la planificación del manejo de los bosques de *N. antarctica*.

CAPÍTULO III

Estructura forestal de los bosques de *Nothofagus antarctica* a lo largo de gradientes de edad y calidad de sitio

3.1. Introducción

Tal como se planteara previamente, dentro del género *Nothofagus*, los bosques de *N. antarctica* son caracterizados como los de mayor amplitud ecológica, desarrollándose en una gran variedad de ambientes (Veblen et al., 1977; Frangi et al., 2004). Esta variabilidad ambiental determina la formación de distintos morfotipos (caméfito, arbustivo o arborescente) (Ramírez et al., 1985). No obstante, dentro de las masas forestales formadas por individuos pertenecientes solo al morfotipo arborescente también se observa una gran variabilidad. Es por ello que es de esperar que a lo largo de su área de distribución, los bosques de ñire presenten importantes variaciones en su estructura forestal. Estas variaciones son debidas a innumerables factores, entre los que se encuentran, la etapa del desarrollo en la que se encuentran los bosques y a la calidad de sitio, así como también la historia de uso particular que presenta cada rodal y la ocurrencia de disturbios, ya sean éstos antrópicos o naturales.

Son escasos los estudios realizados donde se presenten análisis de la estructura forestal de los bosques de *N. antarctica* (e.g. Pauchard et al., 2006; Reque et al., 2007). En dichos estudios se analiza la estructura de manera descriptiva para una zona en particular y sin considerar los gradientes existentes de edad o de calidad de sitio. En Patagonia Sur, Peri (2009) realizó un estudio a nivel provincial donde describen la distribución de los bosques de *N. antarctica* según algunas variables de la estructura forestal (cobertura de dosel, área basal y altura dominante). Pero no existen hasta el momento, análisis de la estructura forestal de los bosques de ñire que, considerando tanto variables individuales como de rodal y evaluando su variación a lo largo de gradientes de edades y de calidades de sitio, puedan ser tomados como descriptores promedio.

Objetivos particulares

El objetivo del presente capítulo es analizar la variación de las distintas variables de la estructura forestal (cualitativas y cuantitativas) de bosques de *N. antarctica* a lo largo de dos gradientes (edad del rodal y calidad de sitio), así como también analizar las relaciones entre las distintas variables estructurales estudiadas.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Toma de datos

Los muestreos se realizaron en rodales naturales de *Nothofagus antarctica* de la parte Argentina de Patagonia Sur: provincia de Santa Cruz (de 51°13' LS a 51°41' LS y de 72°15' LO a 72°03' LO) y provincia de Tierra del Fuego (de 53°54' LS a 54°28' LS y de 66°44' LO a 67°42' LO) (Figura 3.1). El muestreo fue diseñado de manera de cubrir los gradientes naturales de edad (20 a 220 años) y de calidad de sitio (S I a S V, de acuerdo a las clases de sitio descritas en el capítulo II).

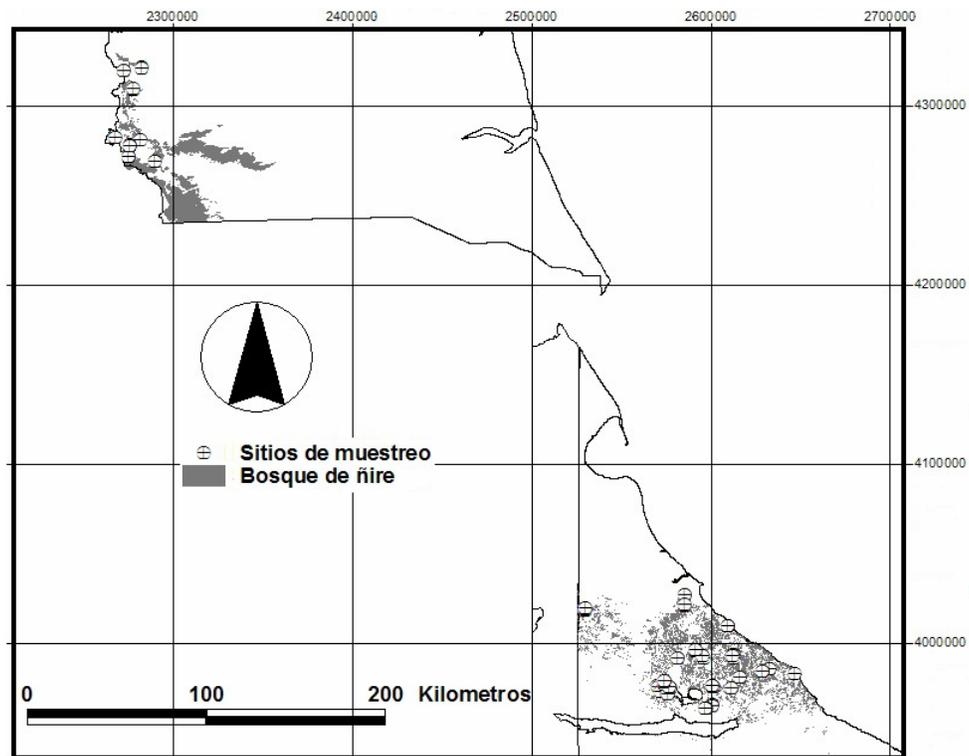


Figura 3.1. Distribución de los bosques de ñire y los sitios de muestreo en Patagonia Sur.

Se realizaron un total de 136 parcelas de diámetro variable (Bitterlich, 1984) en bosques de *N. antarctica* utilizando factores (K) entre 3 y 6. Dichas parcelas se establecieron de modo de cumplir con los siguientes requisitos: (a) estar ubicadas en rodales homogéneos y coetáneos, (b) ser sectores de densidad completa, sin presencia de grandes aberturas en el canopy, (c) no presentar árboles muertos en pie, e (d) incluir más de 10 árboles por parcela.

A cada árbol de la parcela se le midió el diámetro normal a 1,3 m (DAP) usando una forcípula de mano, la altura total (HT) mediante un hipsómetro láser (TruPulse 200 de Laser Technology) y la clase social (CLASE) a través de la posición relativa y tamaño de la copa de cada individuo en el estrato vertical, clasificándolos en dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos. A cada árbol se le determinó la fase de desarrollo basada en una clasificación propuesta por Schmidt & Urzua (1982) para *Nothofagus pumilio*, y diferenciándolos en crecimiento óptimo inicial (COI), crecimiento óptimo final (COF), envejecimiento (ENV) y desmoronamiento (DESM) a partir de las características de la corteza. También se determinó visualmente la sanidad externa de cada individuo clasificándola como: (i) mala, (ii) regular o (iii) buena, dependiendo de la ocurrencia en el fuste de defectos generalizados, localizados o ausentes, respectivamente. Los defectos incluyeron tanto agallas, como canchales, cavidades, rajaduras o daños producidos por la actividad de insectos o pájaros carpinteros. También se clasificó a cada individuo en aprovechable o no aprovechable siguiendo los criterios utilizados actualmente en la industria local de aserrado (e.g., trozas con diámetros mayores a 20 cm, fustes rectos, etc.). Por otra parte, a cada individuo se le extrajo un tarugo mediante barreno de Pressler. La extracción del tarugo se realizó de espaldas al centro de la parcela de modo de aleatorizar los puntos de muestreo sobre el fuste.

3.2.2. Análisis de la muestra

Con el área basal (AB) individual, calculada a partir del DAP de cada árbol muestreado, y utilizando el K de la parcela de diámetro variable, se calculó el número de árboles por hectárea que aporta cada árbol de la parcela. A partir de la suma de los mismos se obtuvo la densidad por hectárea de la parcela (N). A partir del AB de la parcela y del N, se obtuvo un área basal media con la que se determinó el diámetro medio (DM) de cada parcela, el cual es equivalente al diámetro cuadrático medio frecuentemente calculado en parcelas de tamaño fijo. También se calculó la altura dominante (HD) de cada parcela como el promedio de las alturas totales de los árboles dominantes presentes en cada parcela.

Los tarugos fueron montados para su posterior pulido y medición. Bajo lupa se realizaron conteos de anillos hasta la médula en, por lo menos, un tarugo por parcela para determinar la edad de la parcela (edad a la altura del DAP). Asimismo, en cada tarugo se realizaron mediciones periódicas cada 4 años para los últimos 20 años de crecimiento. El intervalo de 4 años seleccionado es considerado suficiente para absorber el efecto de corto plazo de las condiciones climáticas atípicas (Crecente-Campo et al., 2010). En esta Tesis se asume como un supuesto que durante el periodo de 20 años considerado para la medición del crecimiento, la mortalidad es nula, dado que no se realizaron parcelas en lugares donde

había árboles muertos. Este supuesto solo es válido para cada parcela considerada individualmente y sus autorreplicas. Al analizar los datos de todas las parcelas en conjunto, sí se asume la existencia de mortalidad ya que este es un proceso que ocurre desde las etapas tempranas del desarrollo de un rodal hasta las fases adultas. Cabe destacar que en estas latitudes los tiempos de descomposición de la madera son muy lentos (Frangi et al., 1997), por lo que la ausencia de restos de árboles muertos dentro de la parcela es un buen indicador de la no ocurrencia de mortalidad en la misma. A partir de la HD y la edad de cada parcela se pudo determinar la clase de sitio (S) según la función de Newnham de índice de sitio ajustada previamente (Capítulo II). Para determinar el volumen total con corteza (VTCC) de cada individuo se utilizó una ecuación estándar tradicional que se presenta en el capítulo V (VTCC en función del DAP y la HT). Con los datos de VTCC de los árboles individuales se estimó el VTCC del rodal por hectárea. También se determinó el porcentaje del índice de densidad de rodal de cada parcela (%IDR) utilizando un índice de densidad que se presenta en el Capítulo VI. Por otro lado, a partir de los datos obtenidos se calcularon los incrementos anuales en DM, AB por hectárea y VTCC por hectárea para cada parcela.

Para analizar el comportamiento de cada variable considerada de la estructura forestal y los resultados de los incrementos, se hicieron comparaciones a lo largo de gradientes de edad y de calidad de sitio mediante análisis de la varianza (ANOVA) simples y factoriales. La comparación de los valores promedios fue realizada a partir del test de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$).

3.3. Resultados

La base de datos quedó integrada por 136 parcelas que incluyeron un total de 1635 individuos muestreados. La superficie promedio alcanzada por las parcelas fue de 13,3 m² en las fases de crecimiento juveniles (COI-COF), 93,8 m² en la fase de envejecimiento y 162,4 m² en la fase de desmoronamiento. El muestreo abarcó todo el gradiente de edades y de calidad de sitio de la especie (Tabla 3.1). Las clases de sitio menos representadas fueron S IV y S V por lo que, para el análisis estadístico, se las agrupó en una única clase (S IV-V). En cuanto a las fases de desarrollo, la distribución fue más homogénea, excepto en las clases de sitio inferiores, donde las fases de crecimiento óptimo inicial y final (COI y COF) estuvieron menos representadas (7 parcelas) en relación a las fases ENV y DESM (21 parcelas).

Tabla 3.1. Cantidad de parcelas muestreadas a lo largo de los gradientes de calidad de sitio y fase de desarrollo.

Clase de sitio	Fase de desarrollo				Total
	COI	COF	ENV	DESM	
S I	5	9	9	10	33
S II	12	11	7	3	33
S III	10	16	8	8	42
S IV	2	4	2	5	13
S V	0	1	9	5	15
Total	29	41	35	31	136

COI: crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento.

Al analizar las variables estructurales a lo largo del gradiente de clases de sitio (Tabla 3.2), se observó que la mayoría presentó diferencias significativas, excepto las variables edad y densidad que no se diferenciaron estadísticamente. La HD, varió desde un promedio de 4,6 m en S IV-V hasta 11,4 m en S I mostrando diferencias significativas entre todas las clases de sitio. Para el DM, si bien aumentó a medida que mejoró la calidad de sitio, solo se observó una diferencia significativa en la clase de sitio S IV-V (14 cm) respecto de S I, S II y S III, que presentaron DM promedios entre 19 cm y 21 cm. El área basal (AB) aumentó gradualmente desde la clase de sitio S III (50 m².ha⁻¹) hasta S I (60 m².ha⁻¹) diferenciándose estadísticamente solo la clases de sitio S I de S III. En S IV-V se registró un valor de AB intermedio entre S II y S III (51 m².ha⁻¹). El volumen total con corteza (VTCC) aumentó progresivamente a medida que mejoró la calidad de sitio desde un promedio de 163 m³.ha⁻¹ (S IV-V) hasta 347 m³.ha⁻¹ (S I), registrándose diferencias significativas entre todas las calidades de sitio. El porcentaje de índice de densidad de rodal (%IDR) presentó mayores valores en las calidades de sitio superiores (S I y S II) respecto de las inferiores (S III y S IV-V), aunque solo se registraron diferencias significativas entre S I (89%) y S III (70%).

Al analizar los valores de las variables de estructura a lo largo del gradiente de fases de desarrollo (Tabla 3.2), se observaron diferencias significativas para todas las variables consideradas. Como era de esperar, las edades variaron gradualmente desde un promedio de 30 años en COI, aumentado significativamente, hasta un promedio de 156 años en DESM, presentándose diferencias significativas entre todas las fases de desarrollo. La HD, al igual que el DM, también se diferenció significativamente entre todas las fases de desarrollo aumentando gradualmente desde COI (HD: 4,6 y DM: 5,1 cm) hasta DESM (HD: 11,6 y DM: 34.5 cm). La N disminuyó significativamente y de manera exponencial desde la fase COI (17000 ind.ha⁻¹) hasta ENV (1700 ind.ha⁻¹), pero no se registraron diferencias significativas entre esta última fase y DESM (800 ind.ha⁻¹). El AB aumentó progresivamente

a medida que aumentó la fase de desarrollo, sin embargo solo se registraron diferencias significativas entre las fases juveniles (COI y COF) ni entre las fases avanzadas (ENV y DESM). El VTCC, si bien aumentó progresivamente conforme a la fase de desarrollo, presentó diferencias significativas que solo se registraron entre las tres primeras fases de desarrollo, mientras que la fase DESM no se diferenció significativamente de ENV. Por último, el %IDR presentó los menores valores en las fases juveniles, respecto de las fases adultas, aunque la fase COI no mostró diferencias significativas.

Tabla 3.2. Resultados de ANOVA para las variables biométricas relevadas, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Factor	Nivel	Edad (años)	HD (m)	DM (cm)	N (mil ind.ha ⁻¹)	AB (m ² .ha ⁻¹)	VTCC (m ³ .ha ⁻¹)	%IDR (%)
Clase de Sitio	S I	84	11,4 d	20,9 b	6,8	59,7 b	347,1 d	89,2 b
	S II	87	9,6 c	20,6 b	6,8	57,7 ab	305,4 c	85,2 ab
	S III	81	7,5 b	18,7 b	6,7	50,5 a	234,1 b	76,0 a
	S IV-V	88	4,6 a	13,8 a	6,9	51,3 ab	163,4 a	76,0 ab
	F (p)	0,72 (0,54)	121,85 (<0,01)	9,17 (<0,01)	0,01 (0,99)	3,47 (0,02)	27,79 (<0,01)	3,61 (0,02)
Fase de desarrollo	COI	30 a	4,6 a	5,1 a	17,0 c	48,4 a	145,8 a	81,3 ab
	COF	48 b	6,6 b	9,4 b	7,7 b	50,4 a	199,7 b	72,4 a
	ENV	108 c	10,3 c	25,0 c	1,7 a	59,7 b	364,1 c	84,9 b
	DESM	156 d	11,6 d	34,5 d	0,8 a	60,6 b	370,5 c	87,7 b
	F (p)	239,82 (<0,01)	157,13 (<0,01)	163,09 (<0,01)	99,81 (<0,01)	5,60 (0,01)	49,66 (<0,01)	6,85 (0,01)
Interacciones	F (p)	0,71 (0,70)	2,14 (0,03)	2,09 (0,04)	0,37 (0,95)	2,18 (0,03)	1,89 (0,06)	1,66 (0,11)

S: calidad de sitio; HD: altura dominante; DM: diámetro medio; N: densidad; AB: área basal; VTCC: volumen total con corteza; COI: crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento. F (p): estadístico de Fisher y probabilidad asociada ($p < 0,05$). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas para el test de Tukey ($p < 0,05$) entre los niveles de un factor.

De las variables analizadas, se registraron interacciones significativas en HD, DM y AB (Figura 3.2). HD mostró un aumento significativo a medida que cambió la fase de desarrollo, para todas las calidades de sitio, excepto en las S I y S II, donde la HD no registró diferencias entre las fases ENV y DESM. El DM de las fases de crecimiento juveniles no presentó diferencias a lo largo de las distintas clases de sitio, mientras que en las fases ENV y DESM, los diámetros tendieron a disminuir a medida que empeoró la calidad de sitio presentando diferencias significativas. En el caso del AB, en S III aumentó progresivamente entre fases de desarrollo, mientras que en S II, las fases de crecimiento avanzadas presentaron AB significativamente mayores comparadas con las fases juveniles. Por otro lado, S I y S IV-V no presentaron diferencias significativas en el AB entre fases de

desarrollo. Para la densidad, si bien no presentó interacciones, se observó una tendencia a disminuir en la fase COI a medida que empeoró la calidad de sitio. En el resto de las fases de desarrollo, la densidad tendió a permanecer constante entre calidades de sitio excepto en la fase ENV donde se registró un aumento significativo de la densidad para SIV-V. El VTCC, en general tendió a aumentar en todas las calidades de sitio a medida que avanzó la fase de desarrollo. Se registraron diferencias significativas entre COF y ENV para todas las calidades de sitio, excepto en S IV-V. Por otro lado, entre las fases ENV y DESM, solo se registraron diferencias significativas en S III, mientras que en el resto de las calidades de sitio no hubo diferencias. El %IDR presentó diferencias significativas entre fases de desarrollo solo en S III. En general los mayores valores de %IDR se midieron en las mejores calidades de sitio (S I y S II) mientras que los valores más bajos se registraron en las menores calidades de sitio.

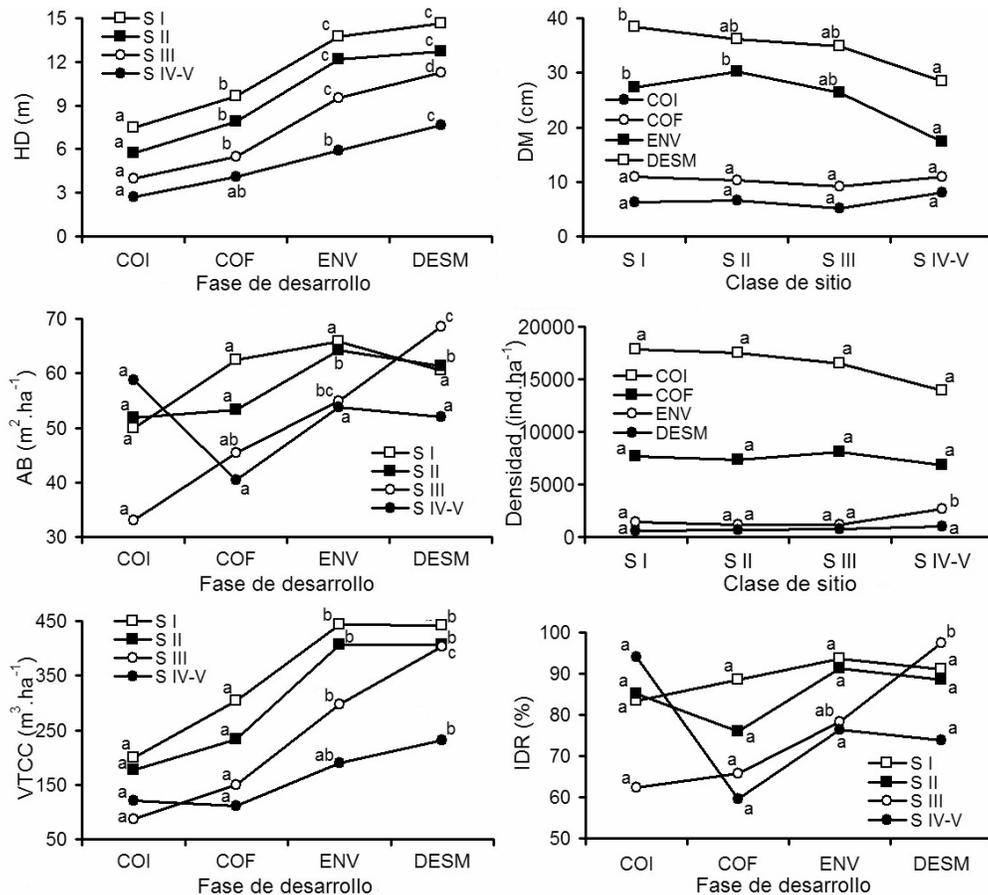


Figura 3.2: Gráficos de las principales interacciones observadas en los ANOVAS factoriales para las variables altura dominante (HD), diámetro medio (DM), área basal (AB), densidad, volumen total con corteza (VTCC) e índice de densidad del rodal (%IDR), considerando la fase de desarrollo y la clase de sitio como factores principales de análisis. COI: crecimiento

óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento. Letras diferentes para los niveles de un factor (ej. calidad de sitio) indican diferencias significativas entre los niveles del otro factor (ej. fase de desarrollo) por el test de Tukey ($p < 0,05$).

En un análisis de las variables cualitativas de los árboles muestreados, se pudo analizar cómo se distribuyó el AB en función del estado sanitario, la forma y la capacidad maderable de los individuos según la calidad de sitio y la fase de desarrollo del rodal (Figura 3.3). En S I, S II y S III, la mayor proporción de AB pertenece a individuos de sanidad buena o regular, mientras que en la peor calidad de sitio (S IV-V), la relación se invierte siendo los individuos de sanidad mala los que representan el mayor porcentaje del AB (Figura 3.3A). Asimismo, en las fases de crecimiento juveniles (COI y COF), la mayor proporción de AB corresponde a individuos de sanidad buena (Figura 3.3B), en segundo lugar a individuos de sanidad regular y por último a individuos de sanidad mala. Mientras que en las fases avanzadas de desarrollo (ENV y DESM) esta relación se invierte, siendo el porcentaje de AB mayor en los individuos de sanidad mala y menor en los de sanidad buena.

El porcentaje AB de acuerdo a la forma de los fustes también se distribuyó de forma diferencial entre las distintas calidades de sitio y fases de desarrollo (Figura 3.3C-D). En S I y S II el mayor % de AB correspondió a los individuos de forma buena o regular, mientras que en S III el mayor % de AB se registró en los individuos de forma regular. Por otro lado en S IV-V, el mayor % de AB correspondió a individuos de forma mala y regular. Durante todas las fases de desarrollo, los individuos de forma regular representaron el mayor % de AB.

Al considerar la capacidad maderable de los individuos mayores a 20 cm, se observó que en las mejores calidades de sitio (S I y S II) los árboles aprovechables representaron el 40% y 41% de AB total (Figura 3.3E), mientras que en las peores calidades (S III y S IV-V) el AB aprovechable fue el 26% y 11% respectivamente. Al comparar la capacidad maderable a lo largo del gradiente de fases de desarrollo, se observó que en las fases juveniles el porcentaje de AB aprovechable es cercano a cero, mientras que en las fases de envejecimiento y desmoronamiento el porcentaje de AB aprovechable fue de 25% y 26% respectivamente (Figura 3.3F).

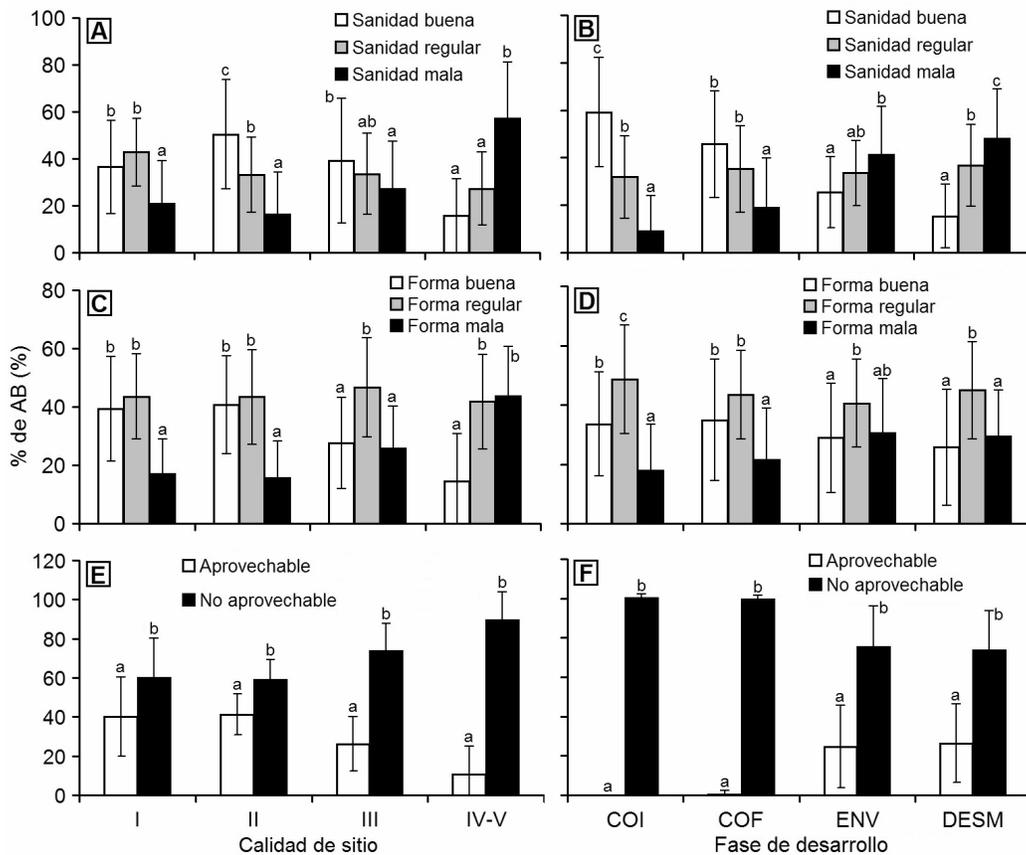


Figura 3.3. Variación del porcentaje de área basal de individuos de diferente Sanidad, forma y aptitud maderera según calidad de sitio y fase de desarrollo. AB: área basal; COI: crecimiento optimo inicial; COF: crecimiento optimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas entre niveles de una variable por el test de Tukey ($p < 0,05$).

Al analizar la distribución del área basal porcentual de las distintas clases sociales a lo largo de gradientes de fases de desarrollo y clases de sitio (Tabla 3.3) se observó que para cada fase de desarrollo y clase de sitio, el porcentaje de AB decreció a medida que disminuyó la clase social, registrándose valores promedio de los porcentajes de AB de 38%, 32%, 21% y 9% para dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos, respectivamente. Entre fases de desarrollo no se registraron diferencias significativas para ninguna clase social. Al analizar el porcentaje de AB de las distintas clases sociales a lo largo del gradiente de clases de sitio, solo se observó una diferencia significativa en porcentaje de AB de los individuos intermedios, que presentó un valor significativamente mayor en S III respecto de S I y S II. En el resto de las clases sociales no se registró ninguna diferencia significativa. Tampoco se registraron interacciones significativas entre ambos factores (fase de desarrollo dominante y clases de sitio).

Tabla 3.3. Resultados de ANOVA para el porcentaje de área basal de cada clase social, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Factor	Nivel	AB DOM (%)	AB COD (%)	AB INT (%)	AB SUP (%)
Fase de desarrollo	COI	36,6	32,9	23,3	7,3
	COF	36,5	33,9	19,9	9,7
	ENV	35,3	33,8	21,1	9,7
	DESM	44,3	28,1	19,1	8,6
	F	2,29	0,81	1,65	0,21
	p()	(0,08)	(0,49)	(0,18)	(0,89)
Clase de sitio	S I	40,6	33,6	18,4 a	7,3
	S II	38,0	37,1	17,8 a	7,1
	S III	36,1	29,0	25,3 b	9,6
	S IV-V	37,5	30,3	20,1 ab	12,0
	F	0,50	1,83	5,62	1,15
	p()	(0,68)	(0,14)	(0,01)	(0,33)
Interacciones	F	0,85	0,66	1,49	1,03
	p()	(0,57)	(0,75)	(0,16)	(0,42)

AB: área basal; DOM: dominante; COD: codominante; INT: intermedio; SUP: suprimido; S: Clase de sitio. F (p): estadístico de Fisher y probabilidad asociada ($p < 0,05$). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas para el test de Tukey ($p < 0,05$) entre los niveles de un factor.

Al evaluar los incrementos medidos a lo largo de los gradientes de calidad de sitio y de fase de desarrollo (Tabla 3.4), se observaron diferencias significativas para las tres variables analizadas (Inc DM, Inc AB, Inc VTCC). En líneas generales, se observaron mayores incrementos en las mejores clases de sitio y en las fases de desarrollo juveniles. Asimismo, se registró una mayor diferenciación estadística en las variables Inc AB e Inc VTCC respecto de Inc DM.

Tabla 3.4. Resultados de ANOVA para el incremento promedio en diámetro, área basal y volumen, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Factor	Nivel	Inc DM (cm.año ⁻¹)	Inc AB (m ² .ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Inc VTCC (m ³ .ha ⁻¹ .año ⁻¹)
Clase de sitio	S I	0,17 b	1,22 c	6,90 d
	S II	0,15 a	1,06 b	5,71 c
	S III	0,14 a	0,88 b	3,95 b
	S IV-V	0,14 a	1,03 a	3,58 a
	F (p)	12,99 (<0,01)	23,18 (<0,01)	124,32 (<0,01)
Fase de desarrollo	COI	0,16 b	1,77 d	5,95 c
	COF	0,15 ab	1,25 c	6,20 c
	ENV	0,14 a	0,66 b	4,44 b
	DESM	0,15 ab	0,50 a	3,55 a
	F (p)	3,87 (<0,01)	269,24 (<0,01)	74,87 (<0,01)
Interacciones	F (p)	2,95 (<0,01)	10,53 (<0,01)	18,01 (<0,01)

S: calidad de sitio; Inc DM: incremento anual del diámetro medio; Inc AB: incremento anual por hectárea en área basal; Inc VTCC: incremento anual en volumen total con corteza; COI: crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento. F (p): estadístico de Fisher y probabilidad asociada ($p < 0,05$). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas para el test de Tukey ($p < 0,05$) entre los niveles de un factor.

Se produjeron interacciones en las tres variables de incremento analizadas (Tabla 3.4). Estas fueron debidas, principalmente a entrecruzamientos entre los niveles dentro de un mismo factor. Esto se pudo visualizar de una manera más clara a partir de ANOVAs simples comparando las distintas calidades de sitio dentro de cada fase de desarrollo (Figura 3.4). Inc DM fue la variable que presentó la mayor cantidad de entrecruzamientos.

Dentro de cada fase de desarrollo el Inc AB tendió a disminuir a medida que empeoró la calidad de sitio registrándose los valores más elevados en la clase de sitio S I. sin embargo, en las fases de desarrollo COI y ENV se observaron mayores valores en S IV-V respecto de S III.

Algo similar se registró para el Inc VTCC, donde también se registraron interacciones. Si bien en general se observó una disminución del Inc VTCC a medida que disminuyó la calidad de sitio, en la fase desmoronamiento no se observó dicha tendencia. Contrariamente, se registró un valor significativamente mayor en S III respecto del resto de las clases de sitio para esa fase de desarrollo.

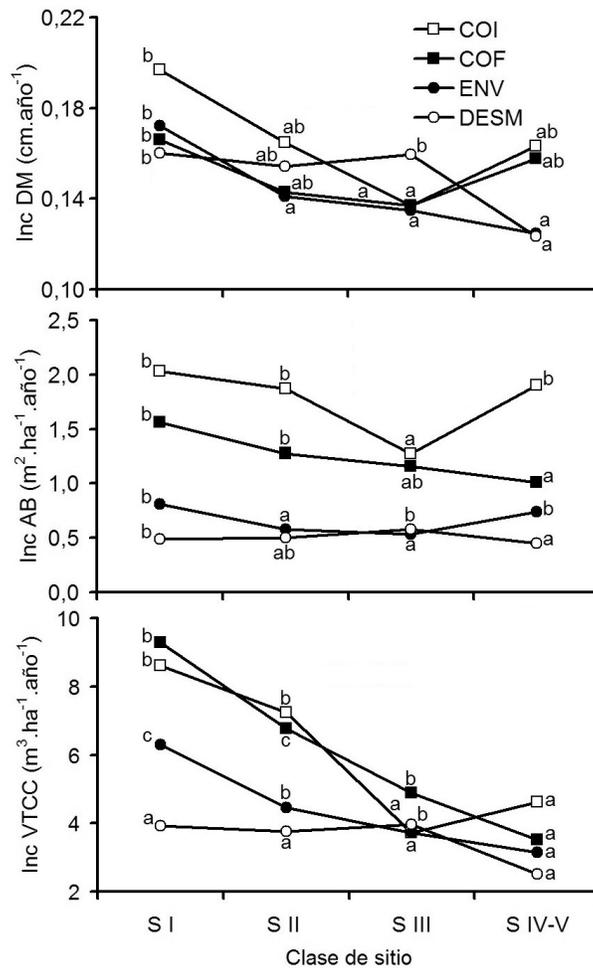


Figura 3.4. Gráficos de las principales interacciones observadas en los ANOVAS factoriales para las variables de incremento promedio en diámetro (Inc DM), área basal (Inc AB) y volumen (Inc VTCC), considerando la fase de desarrollo y la clase de sitio como factores principales de análisis. COI: crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento. Letras diferentes para los niveles de fase de desarrollo indican diferencias significativas por el test de Tukey ($p < 0,05$) entre calidades de sitio.

3.4. Discusión

El muestreo abarcó los gradientes naturales para la especie en Patagonia Sur (Peri et al., 2010), incluyendo rodales desde las menores a las mayores calidades de sitio, así como también desde rodales secundarios jóvenes hasta rodales primarios adultos en fase de desmoronamiento. Las máximas edades registradas alcanzaron los 200 años, siendo

claramente inferiores a las registradas para otras especies del género *Nothofagus*. Por ejemplo, los árboles de *N. pumilio* y *N. betuloides* suelen alcanzar los 400-500 años de edad (Donoso, 2006; Martínez Pastur et al., 2008a) mientras que *N. cunninghamii* y *N. solandri* de Oceanía también alcanzan edades muy superiores a las obtenidas en el presente muestro (Wardle, 1970; Howard, 1973; Norton, 1983). Las máximas edades muestreadas coinciden con las observadas en otros estudios donde se afirma que *N. antarctica* es una especie de vida corta, dentro del rango de edades de los *Nothofagus*, con individuos que raramente alcanzan los 200 años de edad (Veblen et al., 1996). Los rodales menos representados en el muestreo fueron aquellos que pertenecieron a las clases de sitio inferiores, debido a que usualmente crecen en condiciones ambientales extremas (zonas de bajas precipitaciones o de fuertes vientos) como las encontradas en las zonas periféricas de la distribución de la especie (Peri, 2009), las cuales suelen presentar mayores dificultades de acceso.

La ausencia de diferencias significativas para la variable edad entre las diferentes calidades de sitio demuestra que la muestra estuvo equilibrada respecto de esta variable. Por otro lado, como era de esperar, la edad se diferenció entre todas las fases de desarrollo. Cada fase de desarrollo presentó una edad promedio menor a la las registradas para los bosques de *N. pumilio*. Martínez Pastur (2006) determinó en bosques de *N. pumilio* edades cercanas a los 100 años para rodales en fase de crecimiento óptimo (COI-COF), y edades de 210 y 370 años para rodales en fase ENV y DESM, respectivamente.

La altura dominante, como era de esperar, se diferenció entre las distintas calidades de sitio. Esto se debe a que es esta misma variable la utilizada para calcular el índice de sitio en el que se basa la clasificación de calidades de sitio. Por otra parte, en el gradiente de fases de desarrollo se refleja el comportamiento del crecimiento, como ya fue descrito y modelado por Ivancich et al. (2011) donde la altura dominante aumenta conforme aumenta la edad, pero una vez alcanzada la madurez (fases de envejecimiento y desmoronamiento) el aumento es mínimo (Sturtevant & Seagle, 2004). Algo similar se observa con la variable DM donde también se refleja el crecimiento a lo largo de las fases de desarrollo.

La densidad, que no se diferenció entre calidades de sitio, si lo hizo entre fases de desarrollo. La disminución observada en N está vinculada a la mortalidad debida a la competencia por recursos (autoraleo), la cual libera recursos para los árboles remanentes permitiendo que continúen creciendo (Oliver & Larson, 1996). Esta mortalidad es alta en los primeros años del desarrollo (Armesto et al., 1992) presentando un patrón exponencial que esta explicado por la ley de autoraleo natural de Yoda et al. (1963).

El VTCC mostró una total correspondencia con la calidad de sitio. La diferenciación observada entre las diferentes calidades de sitio se debe a que las principales variables que afectan el VTCC son la altura total y el diámetro de los árboles. Al analizar esta variable a lo largo del gradiente de fases de desarrollo se observó un aumento en su valor hasta la fase

ENV manteniendo su magnitud en la fase DESM. Esto se explica debido a que si bien los árboles a edades avanzadas, continúan creciendo en diámetro, su incremento en altura es cercano a cero y la disminución de la densidad que ocurre desde la fase ENV hasta la fase DESM compensa el crecimiento individual de cada árbol. De esta manera se pueden obtener valores de VTCC similares en las fases ENV y DESM. De acuerdo a Gracia (2001), en las masas forestales en las que se ha alcanzado la máxima cantidad de biomasa, cualquier mortalidad en la población, que supone una reducción de la población, se compensa por un incremento en biomasa individual que compensa la biomasa eliminada con los individuos muertos. Permaneciendo el valor de la biomasa total constante.

El porcentaje de IDR presentó una relación directa con la calidad de sitio, la cual esta relacionada con el mayor AB registrado en las mejores calidades de sitio. Por otro lado, los bajos valores de porcentaje IDR registrados en las fases COI y COF pueden deberse a un muestreo deficiente dentro de esas fases de desarrollo, ya que en las clases de sitio S IV-V estuvieron poco representadas.

El menor porcentaje de AB con sanidad buena medido en las menores calidades de sitio respecto del porcentaje de AB registrado en las mayores calidades, puede estar vinculado a las condiciones ambientales que se presentan en los distintos rodales. Los árboles que crecen en rodales de peor calidad de sitio, al desarrollarse en ambientes más rigurosos donde las condiciones de estrés son mayores, se encuentran más predispuestos a los ataques de hongos xilófagos que producen las pudriciones en los fustes (Dobbertin, 2005). Por otro lado, como es de esperar, las pudriciones, principales determinantes de la mala sanidad de los árboles, son más frecuentes en los estadios avanzados del desarrollo en comparación con los estadios juveniles. Así como también es más frecuente encontrar problemas de sanidad en individuos pertenecientes a las clases sociales suprimidas respecto de las dominantes (Nystrom, 1981). El mayor porcentaje de AB aprovechable registrado en las mejores calidades de sitio está vinculado a los mayores porcentajes de AB con buena forma y buena sanidad. El aumento observado en el porcentaje de AB aprovechable que se produce en los rodales de mayor edad es debido a que a medida que los árboles crecen, estos alcanzan el tamaño de cosecha ($DAP > 20$ cm) y están sujetos a ser clasificados como individuos aprovechables. Los diferentes patrones observados en el porcentaje de área basal a lo largo de los gradientes analizados muestran la importancia de considerar las variables sanidad, forma y capacidad maderable tanto en los inventarios forestales como en el desarrollo de modelos biométricos.

La disminución del porcentaje de AB a medida que disminuye la clase social coincidió con la tendencia registrada para *N. pumilio* (Martínez Pastur, 2006) que presenta valores de porcentaje de AB de 32% a 49% en árboles dominantes, 35% a 43% en codominantes, 25% a 7% en intermedios y de 9% a 1% en los suprimidos. Este patrón, se

debe a que al ser bosques relativamente abiertos, los bosques de ñire tienden a formar un único estrato arbóreo, disminuyendo el número de árboles en los estratos inferiores (clases sociales suprimidas).

A pesar de esto, el porcentaje de AB de cada clase social permaneció constante a lo largo del gradiente de fases de desarrollo. Contrariamente, los bosques de *N. pumilio* presentan un aumento en el porcentaje del AB de dominantes y codominantes a lo largo del gradientes de edades y una disminución del porcentaje de AB en intermedios y suprimidos (Martínez Pastur 2006). Esto puede deberse a que el número de árboles incluido en cada parcela no fue suficiente para capturar la variabilidad que puede existir en el porcentaje de AB de las distintas clases sociales a lo largo del desarrollo de los rodales.

Las escasas diferencias registradas en el Inc DM entre clases de sitio y fases de desarrollo pueden deberse a la influencia de otros factores (como la clase de copa) que enmascaran las posibles diferencias de incremento que se produzcan a lo largo de dichos gradientes. Por ejemplo, Drobyshev et al. (2007) registró en bosques *Quercus robur* una correlación positiva entre el incremento diamétrico de los árboles y su tamaño de la copa. Los valores de incremento diamétrico observados en el presente trabajo fueron levemente superiores a los registrados en bosques de *N. pumilio*. Martínez Pastur (2006) registró valores promedio entre 0,14 y 0,09 cm.año⁻¹ para rodales de la mejor y la peor calidad de sitio respectivamente. Sin embargo, el Inc VTCC presentó valores levemente inferiores a los registrados para *N. pumilio* (entre 7 y 4 m³.ha⁻¹.año⁻¹ para la mejor y peor calidad de sitio respectivamente). Esto se debe a que los bosques de *N. pumilio* presentan alturas superiores a la de los bosques de *N. antarctica*, y en consecuencia las calidades de sitio mayores tienen una mayor productividad.

Los resultados observados en las variables estudiadas a lo largo de los dos gradientes analizados (calidad de sitio y fase de desarrollo) justifican su inclusión en modelos de predicción, como los de crecimiento y producción a ajustar a lo largo de esta Tesis. Por otro lado las diferencias encontradas en los incrementos estudiados ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar, o bien modelos estratificados (familias de ecuaciones), o bien modelos de mayor complejidad que incorporen una mayor cantidad de variables (Zeide, 1991; 1993; Hasenauer et al., 2000; Martínez Pastur et al., 2008a) para representar toda la variabilidad observada para la especie.

3.5. Conclusiones particulares

El presente análisis brinda una visión de las variaciones en las variables de estructura forestal presentes en los bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur. El mismo ayudó a

comprender las relaciones entre las distintas variables y los gradientes de calidad de sitio y fase de desarrollo existentes en la especie creciendo en estos bosques.

Es importante resaltar el carácter transitorio del estado de cualquier variable estructural analizada ya que a lo largo del desarrollo de un rodal tanto las variables dasométricas cuantitativas (e.g., AB, HD, VTCC) como las cualitativas (e.g., porcentaje de AB de sanidad buena, porcentaje de AB de forma buena) se ven modificadas. Asimismo, los patrones de dichas modificaciones varían entre las distintas calidades de sitio, justificando la inclusión de dichas variables en las futuras modelizaciones.

Este capítulo destaca la importancia de considerar los gradientes de edad y de calidad de sitio en los estudios vinculados a la estructura de los bosques de *N. antarctica*. No contemplar dichos gradientes implicaría desconocer una gran fuente de variación para la mayoría de las variables que comúnmente se utilizan para caracterizar estos bosques.

CAPÍTULO IV

Crecimiento diamétrico; Familia de ecuaciones simples vs. ecuaciones integrales

4.1. Introducción

El conocimiento de los patrones de crecimiento diamétrico de las especies forestales resulta clave para establecer herramientas que permitan predecir el desarrollo de los árboles en rodales bajo una dinámica natural o bajo distintas propuestas de manejo. Los factores que afectan este crecimiento diamétrico son innumerables y de diversa naturaleza (Hari, 1996). Entre ellos, se pueden mencionar la edad, la condición de competencia, la estructura forestal y la calidad de sitio (Andreassen & Tomter, 2003). El crecimiento en diámetro de los árboles sigue una trayectoria levemente sigmoidea a lo largo del tiempo, aunque responde a fluctuaciones y tendencias ambientales (Zeide, 1993).

Las primeras ecuaciones de crecimiento diamétrico (e.g., Richards, 1959) se basaron en que la expansión del crecimiento es proporcional a la edad de los árboles (Zeide, 1993; Vanclay, 1994). El uso de esas ecuaciones tradicionales continúa hasta hoy (Vanclay, 2010; Lynch & Zhang, 2011), donde las mismas consideran una sola variable independiente, y presentan una baja capacidad predictora cuando se las utiliza para estimar el crecimiento diamétrico de árboles que crecen en diferentes condiciones ambientales o de rodal (diferentes calidades de sitio o distinta condición de competencia).

Una forma de predecir el crecimiento diamétrico a partir de ecuaciones simples (una sola variable independiente) y para diversas condiciones de rodal pero manteniendo la exactitud en la predicción, es a través de la implementación de familias de ecuaciones, donde los datos y las ecuaciones deben estar compartimentalizados de acuerdo a los diferentes factores considerados (e.g., calidad de sitio del rodal, clase de copa de los árboles, tratamientos silviculturales) (Peri & Martínez Pastur, 1996; Martínez Pastur & Fernández, 1997; Chauchard & Sbrancia, 2003). Otra opción, para predecir el crecimiento en diferentes condiciones de rodal es modificar los modelos tradicionales intentando incluir más variables y evitar el uso de familias de ecuaciones. Un ejemplo satisfactorio es la propuesta de Ek (1971) para el crecimiento en altura, que fue usado para varias especies forestales durante las últimas décadas (Payandeh & Wang, 1994; Wang & Payandeh, 1994b). Para el crecimiento diamétrico se han desarrollado algunos modelos que emplean diferentes variables (e.g., edad, índices de competencia, calidad de sitio) (e.g., Uzoh & Oliver, 2008; Lhotka & Loewenstein, 2011).

Objetivos particulares

El objetivo del presente capítulo es desarrollar modelos que permitan predecir los diferentes patrones que presenta el crecimiento diamétrico de los árboles de *Nothofagus antarctica* a lo largo de gradientes de edad, calidad de sitio y clase social. Asimismo, se compararon dos propuestas en el uso de modelos de crecimiento diamétrico de árboles: (i) una familia de 16 ecuaciones tradicionales ajustadas en gradientes de calidad de sitio y de clases de copa, y (ii) una ecuación global de crecimiento diamétrico que integre las variables correspondientes a la calidad de sitio y la clase de copa. Asimismo, se establecieron las siguientes preguntas: (i) ¿es posible simplificar los modelos de estimación del crecimiento diamétrico usando una única ecuación global en lugar de una familia de ecuaciones tradicionales?, (ii) ¿esta simplificación perjudica el ajuste y exactitud de la estimación?, y (iii) ¿esta simplificación tiene influencia sobre el comportamiento biológico de los modelos?.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Toma de datos y análisis de la muestra.

Los datos utilizados para el desarrollo de los modelos provienen de muestras de barreno realizadas sobre individuos medidos en parcelas de diámetro variable (Bitterlich, 1984). Tanto el muestreo como el análisis de la muestra para la obtención de los valores de incremento diamétrico utilizados en el presente capítulo se explicaron en detalle en el ítem Materiales y Métodos del Capítulo III (Apartados 3.2.1. y 3.2.2.).

4.2.2. Ajuste y evaluación de modelos

A partir de la base de datos obtenida se ajustaron modelos de crecimiento en diámetro. Los distintos modelos fueron ajustados a partir técnicas de regresión no lineal mediante el algoritmo de Marquardt, utilizando el software Statgraphics 5.1

Por un lado se ajustó una ecuación de Chapman-Richards (Zeide, 1993) [1] para cada combinación de clase social y clase de sitio obteniendo un total de 16 ecuaciones. Para el ajuste de este modelo, las clases de sitio IV y V fueron agrupadas debido al menor número de muestras obtenidas en dichas clases (ver apartado 3.3).

$$DAP = a(1 - \exp^{(-bt)})^c \quad [1]$$

Donde a , b y c son coeficiente del modelo; DAP : diámetro normal a 1,30 m (cm); \exp : base de los logaritmos naturales; t : edad (años).

También se ajustó un segundo modelo [2] propuesto por Martínez Pastur (2006) para *Nothofagus pumilio*, que está basado en la ecuación de Richards (1959), las modificaciones planteadas por Ek (1971) y las utilizadas para las estimaciones de crecimiento en altura e índices de sitio (Payandeh & Wang, 1994; Wang & Payandeh, 1994a; Martínez Pastur et al., 1997).

$$DAP = (a(5 - CS)^b)(c(6 - S)^d)(1 - \exp^{(et)})^{(f(6-S)^g)} \quad [2]$$

Donde a , b , c , d , e , f y g son coeficientes del modelo; DAP : diámetro normal a 1,30 m (cm); CS : Clase Social; S : Clase de sitio; \exp : base de los logaritmos naturales; t : edad (años).

El análisis de los distintos modelos ajustados se evaluó a partir del coeficiente de determinación ajustado, el error medio de la estimación (EME), el error medio absoluto (EMA), el error medio porcentual (% \bar{e}), el error medio porcentual en valor absoluto (% $|\bar{e}|$) y el error estándar de la estimación (ESE) (las ecuaciones se presentan en el apartado 3.2.4. del Capítulo II). Asimismo, se realizaron los análisis de los residuales a partir de autovalidaciones a lo largo de diferentes gradientes (edades, frecuencias diamétricas y calidades de sitio). Para la evaluación de los diferentes modelos también se interpretaron visualmente las curvas analizando el comportamiento biológico de los mismos.

4.3. Resultados

4.3.1. Modelos individuales por clase de sitio y clase social

Los modelos ajustados explicaron entre el 75% y el 92% de la variación del los DAP para las clases de sitio S I, S II y S III, mientras que para S IV-V los modelos solo explicaron entre el 54% y el 62% de la variación (Tabla 4.1). El error medio de la estimación (EME) fue cercano a cero en todos los casos variando entre -0,3 cm y 0,0 cm. El error medio absoluto (EMA) varió entre 2,0 cm y 7,3 cm registrándose los mayores valores para cada clase de

sitio en las clases sociales (CS) superiores mientras que los menores valores de EMA se obtuvieron para las CS inferiores. Finalmente, el error estándar de la estimación (ESE) varió entre 2,6 cm y 9,2 cm registrándose los mayores valores en las menores clases de sitio.

Tabla 4.1. Parámetros y estadísticos de los modelos de crecimiento en diámetro (*DAP*) para diferentes clases de sitio y clases sociales.

Clase de Sitio	Clase social	A	b	c	R ² aj.	EME (cm)	EMA (cm)	ESE (cm)
S I	Dominante	95,513	0.0056	1,197	83,3	-0,11	4,69	6,89
S I	Codominante	41,261	0.0178	1,830	84,6	-0,08	3,84	5,12
S I	Intermedio	36,774	0,0204	2,151	74,9	-0,11	4,47	5,95
S I	Suprimido	31,824	0,0155	1,753	91,8	-0,06	1,99	2,58
S II	Dominante	223,938	0,0018	1,052	88,6	-0,08	4,05	6,18
S II	Codominante	76,306	0,0069	1,377	85,5	-0,11	3,61	5,39
S II	Intermedio	54,353	0,0079	1,325	78,5	-0,05	3,49	5,06
S II	Suprimido	46,950	0,0079	1,358	81,9	-0,15	2,53	3,38
S III	Dominante	73,221	0,0068	1,226	85,9	-0,03	3,80	5,69
S III	Codominante	51,115	0,0131	1,712	86,6	-0,09	3,62	5,15
S III	Intermedio	54,034	0,0094	1,527	86,0	-0,04	3,45	5,03
S III	Suprimido	100,773	0,0029	1,170	87,7	-0,02	2,54	3,81
S IV-V	Dominante	157,349	0,0017	1,033	53,6	-0,02	7,26	9,15
S IV-V	Codominante	387,305	0,0006	1,066	61,4	-0,19	4,97	6,61
S IV-V	Intermedio	506,918	0,0003	0,976	62,1	-0,30	4,88	6,50
S IV-V	Suprimido	848,988	0,0001	0,854	60,3	-0,10	3,44	4,77

Donde: *a*, *b* y *c*: parámetros de los modelos; R²aj.: coeficiente de determinación ajustado; EME: error medio de la estimación; EMA: error medio absoluto; ESE: error estándar de la estimación.

Al comparar valores observados vs. valores predichos integrando todas las ecuaciones individuales se obtiene una dispersión de datos típica de los modelos forestales en la que a medida que aumenta la variable a predecir se produce un mayor dispersión (Figura 4.1). No obstante, la nube de puntos obtenida presenta una forma acampanada simétrica, aunque se observan algunos puntos en la parte superior de la figura, que pueden deberse a árboles que hayan crecido de manera solitaria sin el efecto de la competencia de

árboles vecinos. Los pequeños subgrupos de a seis datos que se observan en la Figura 4.1 se corresponden con las seis auto-réplicas obtenidas de cada individuo.

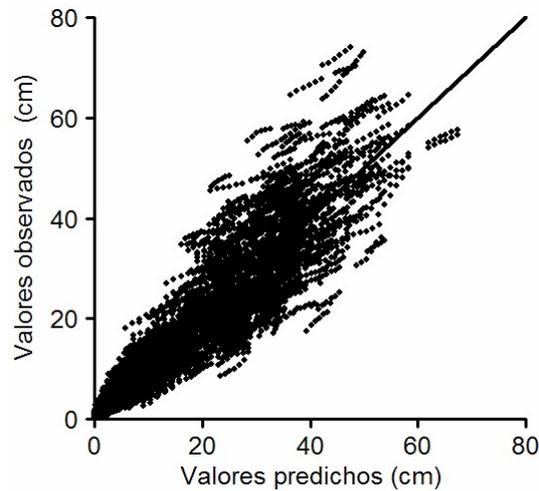


Figura 4.1. Dispersión de datos de la familia de ecuaciones individuales.

El ajuste de los modelos se refleja en las falencias y calidad de los datos tomados (Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5). Dentro de la clase de sitio S I, se obtuvieron muestras de todo el rango de edades para todas las clases sociales, excepto para la CS suprimidos donde la cantidad de datos obtenidos fue menor al resto de las CS. Otra característica de la base de datos es la variabilidad de los datos obtenidos, incluso dentro de una misma CS y S. Por ejemplo, un árbol dominante de 150 años de edad de S I, puede tener entre 30 y 72 cm de DAP, mientras que un árbol de CS intermedia de 150 años en una S III puede presentar un DAP de 22 a 53 cm.

Los modelos ajustados para la S I (Figura 4.2) reflejan una tasa de crecimiento concordante con la CS. Los árboles dominantes presentan la mayor tasa de crecimiento porque sus copas están más expuestas a la luz, mientras que a medida que disminuye la CS los árboles reciben cada vez menos luz directa y la tasa de crecimiento disminuye. A una edad de 100 años las modelizaciones determinan un DAP de 34 cm para los dominantes, 29 cm para los codominantes, 27 cm para los intermedios y 20 cm para los suprimidos. Una de las falencias del muestreo consiste en la ausencia de parcelas en rodales de S I que superen los 170 años de edad. El rango de edad faltante no pudo ser cubierto durante el muestreo, ya que las edades quedaron definidas luego del análisis en laboratorio de los tarugos.

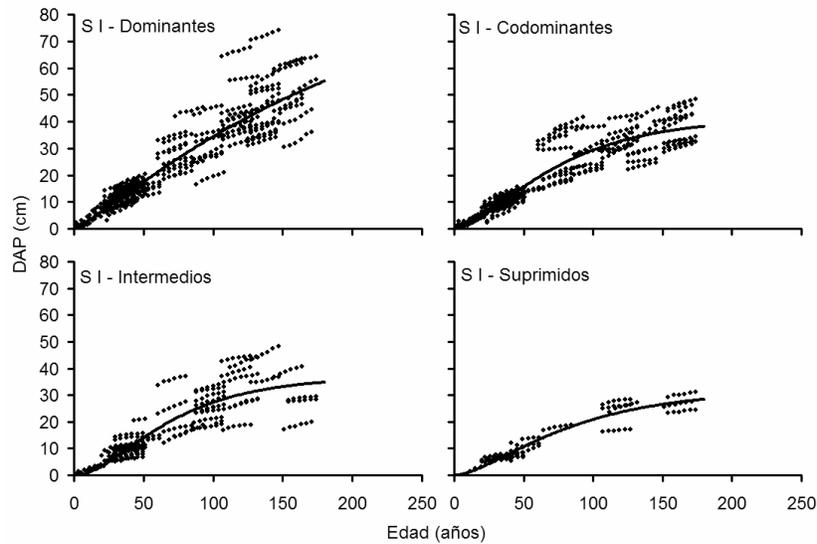


Figura 4.2. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio I.

Para S II se registró una escasa presencia de individuos por encima de los 170 años y entre los 50 y los 70 años de edad. Las CS intermedios y suprimidos son las que menos individuos presentaron, sin superar en ningún caso los 170 años. No obstante los modelos determinaron para una edad de 100 años un DAP de 33 cm para árboles dominantes, de 30 cm para codominantes, 25 cm para intermedios y 20 cm para los suprimidos.

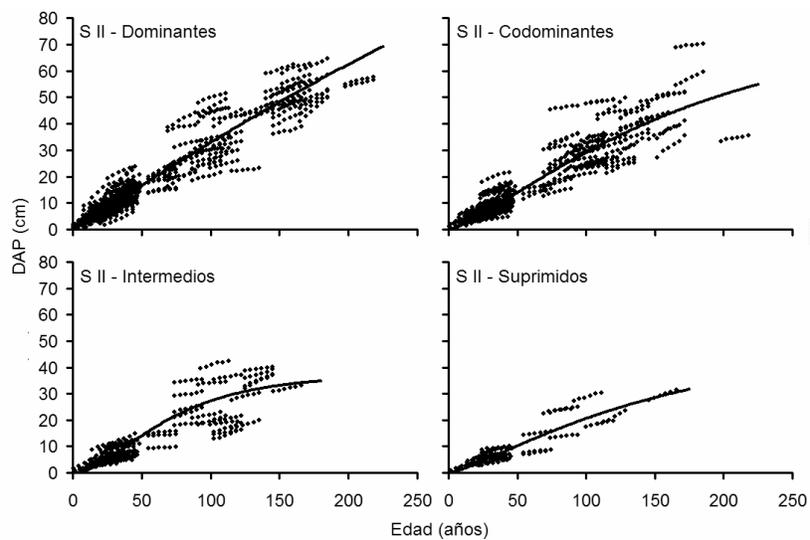


Figura 4.3. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio II.

La distribución de los datos de clase de sitio media (S III) se caracterizó por la abundancia de datos de edades juveniles y edades avanzadas, pero fueron escasos los datos pertenecientes a edades intermedias (70-110 años) (Figura 4.4). En esta clase de sitio los modelos ajustados también reflejaron la declinación en el crecimiento producto de la competencia de las copas (Figuras 4.1 y 4.2). A una edad de 100 años, los modelos determinaron un DAP de 31 cm para árboles dominantes, de 30 cm para los codominantes, de 25 cm para los intermedios y de 20 cm para los suprimidos.

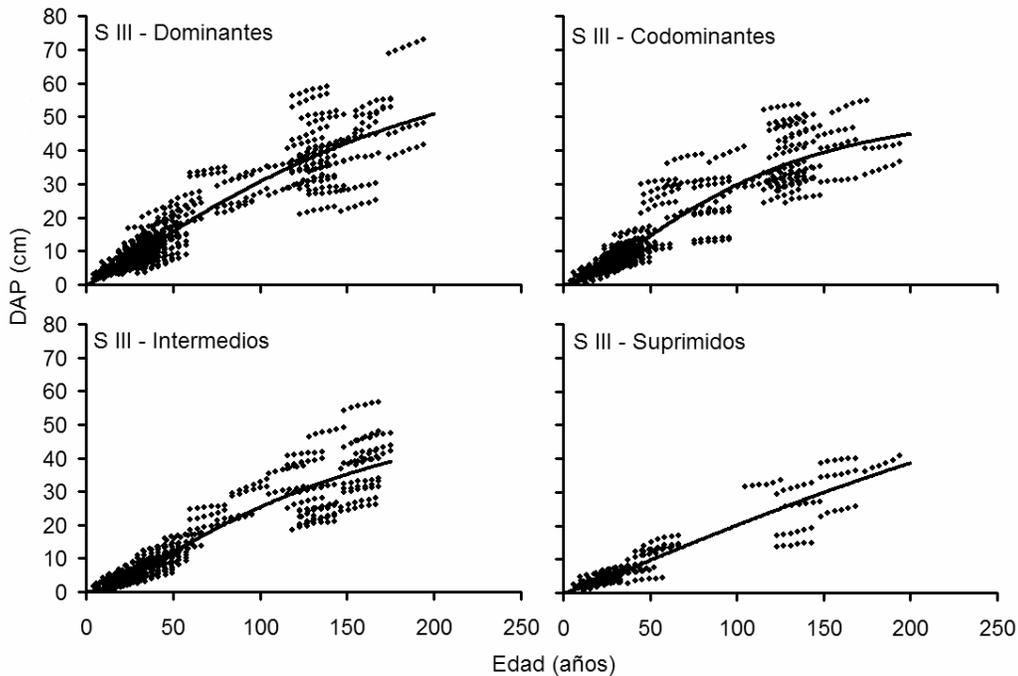


Figura 4.4. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio III.

La clase de sitio baja (S IV-V) presentó una mejor distribución de datos que la calidad de sitio media, aunque se observó una escasez de individuos por encima de los 150 años de edad para todas las clases sociales excepto para la CS dominante. La dispersión de datos mostró una gran variabilidad registrándose para una edad de 100 años diámetros de 31 a 24 cm para árboles dominantes, de 30 a 18 cm para los codominantes, de 25 a 18 cm para los intermedios y de 20 a 13 cm para los suprimidos. Por otra parte los modelos determinaron para esa misma edad (100 años) diámetros de 23,6, 18,2, 17,9 y 13,3 cm para las CS dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos respectivamente.

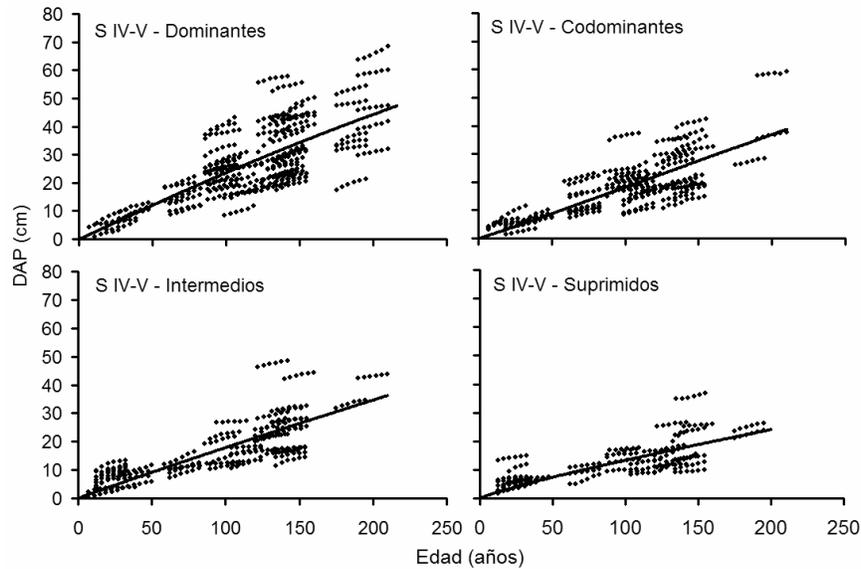


Figura 4.5. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio IV y V.

Al comparar los modelos de crecimiento en diámetro en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio, los mismos presentaron una declinación a medida que la clase social varió de dominante a suprimido. Sin embargo, pueden advertirse algunas falencias al compararlos gráficamente (Figura 4.6). En S I los modelos correspondientes a las clases sociales codominante, intermedio y suprimido presentaron una declinación en su crecimiento a partir de los 100 años aproximadamente, excepto en la CS dominante que presentó una curva que se asemeja a una recta. En S II también se observa dicha declinación pero menos pronunciada que en S I. En S III y S IV-V se observaron incoherencias que determinan entrecruzamientos y solapamientos entre curvas de distinta clase social dentro de una misma clase de sitio. Por ejemplo, en S III entre los 70 y los 120 años los modelos de las CS dominante y codominante presentaron un solapamiento de curvas determinado diámetros iguales. La mayoría de los modelos ajustados reflejaron la declinación de los modelos producto de la competencia de las copas, aunque presentaron distinta forma a medida que aumentó la competencia. En las clases de sitio inferiores (S IV y S V) no se observó dicha declinación del crecimiento a edades avanzadas.

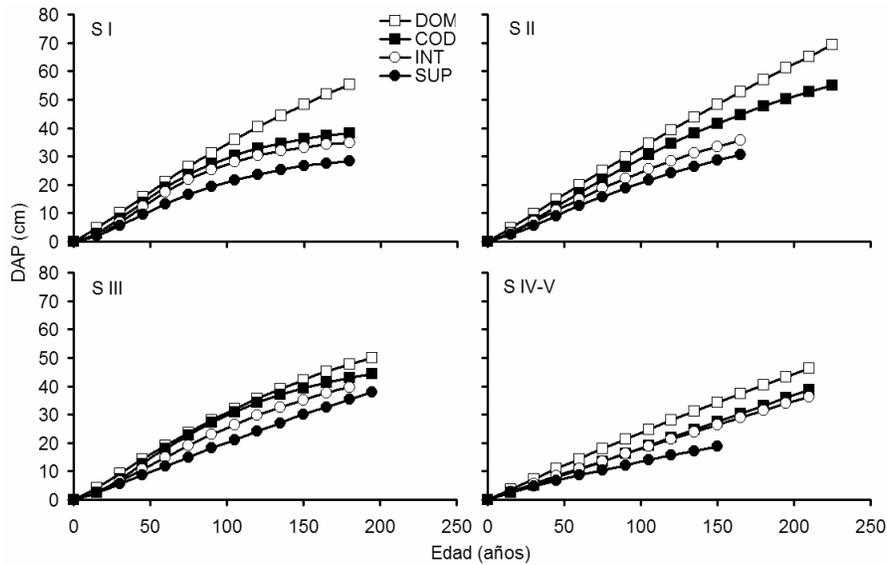


Figura 4.6. Comparación de los modelos de crecimiento en diámetro (*DAP*) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio (S). Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

La familia de modelos ajustados también muestra sus limitaciones al ser comparados en gradientes de clases de sitio para diferentes clases sociales (Figura 4.6). Dentro de cada clase social se observó que hubo una mayor semejanza entre las curvas correspondientes a S I, S II y S III (Figura 4.7). Produciéndose, en algunos casos, solapamientos de curvas. En general, dichas curvas produjeron una mayor diferenciación a partir de los 100 años de edad aproximadamente. Por otro lado, la curva correspondiente a S IV-V fue la que más se diferenció del resto. Una de las falencias más importantes que se observó en la familia de curvas es el entrecruzamiento que se produce entre clases de sitio para una misma clase social. Por ejemplo, para la clase social codominante, a partir de los 120, S II y S III muestran mayores diámetros que S I. Este tipo de incongruencias, también se observó para el resto de las clases sociales.

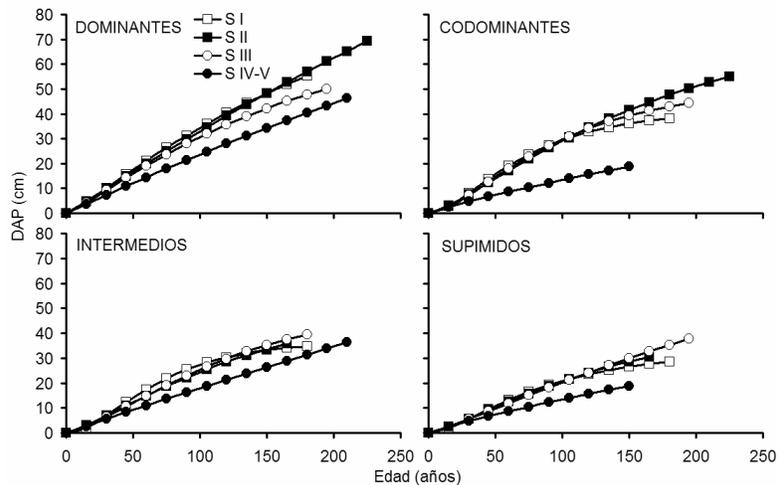


Figura 4.7. Comparación de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio (S) para diferentes clases sociales.

Otra alternativa para evaluar la calidad de los modelos es analizar los puntos de inflexión de las curvas de incremento diamétrico (Figura 4.8), que indican el momento de máximo incremento, a partir del cuál comienza a decrecer la tasa de crecimiento. Solo en S II los valores de máximo incremento diamétrico presentaron valores conformes a la CS mostrando mayores picos en la CS dominante y disminuyendo en la medida que disminuyó la CS. En el resto de las clases de sitio, dicha condición no se cumplió. S III fue la única en la que el punto de inflexión de la curva fue alcanzado primero por los individuos dominantes, luego por los codominantes y los intermedios y por último por los suprimidos. Aunque en esta clase de sitio se produjo la inconsistencia de que los codominantes mostraron un mayor potencial de crecimiento que los dominantes. El resto de las clases de sitio reflejaron mayores incoherencias entre clases sociales. En el caso de S IV-V, los individuos intermedios y los suprimidos alcanzaron el punto de inflexión más tempranamente que los dominantes y codominantes.

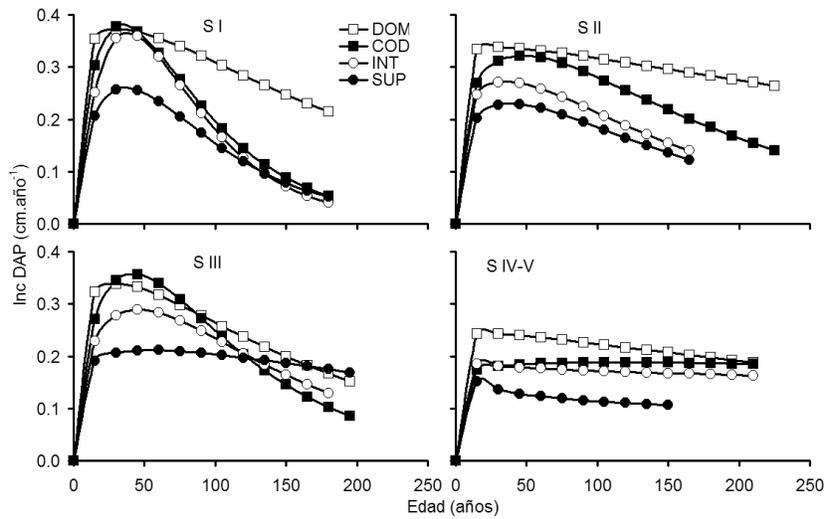


Figura 4.8. Comparación de los incrementos diamétricos de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio (S). Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

Al comparar los incrementos diamétricos de los modelos de crecimiento en diámetro en gradientes de clases de sitio para diferentes clases sociales (Figura 4.9) también se observaron algunas incoherencias, principalmente por efectos de la superposición de las tasas de incrementos. Es de esperar que las tasas de incremento sean mayores en las mejores calidades de sitio para una clase determinada a cualquier edad considerada. Sin embargo se produjeron entrecruzamiento de curvas dentro de todas las clases sociales.

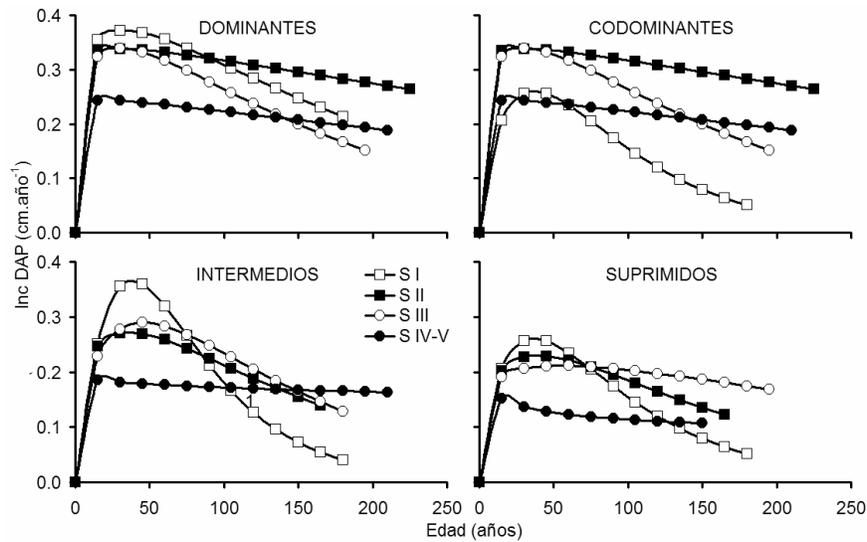


Figura 4.9. Comparación de los incrementos diamétricos de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio (S) para diferentes clases sociales.

Al comparar los errores obtenidos a lo largo de un gradiente de clases diamétricas dentro de cada clase de sitio (Figura 4.10) se observó que las menores clases diamétricas (DAP < 30 cm) tendieron a subestimar levemente (valores positivos) mientras que las clases mayores (DAP > 30 cm) sobreestimaron (valores negativos). Este comportamiento se observó para todas las clases de sitio tanto para los EME como para el %ē. En ambos casos, los errores promedio en centímetros y porcentuales, en general presentaron valores mayores en las clases de sitio más bajas (S III y S IV-V), mientras que los menores valores se registraron en S I y S II.

Al considerar el EMA (cm), se observaron aumentos para todas las clases de sitio mientras mayor era la clase diamétrica. Excepto en la clase de sitio III en que el error absoluto de la clase diamétrica de 30-45 cm fue menor que la de 15-30 cm. Por otro lado, el error absoluto porcentual presentó los mayores valores en clase diamétrica inferior (< 15 cm) para todas las clases de sitio. Mientras que los menores valores se registraron en las mayores clases diamétricas (30-45 cm y > 45 cm) para todas las clases de sitio excepto para la clase de sitio inferior (IV-V) en que los menores valores se registraron en las clases diamétricas intermedias.

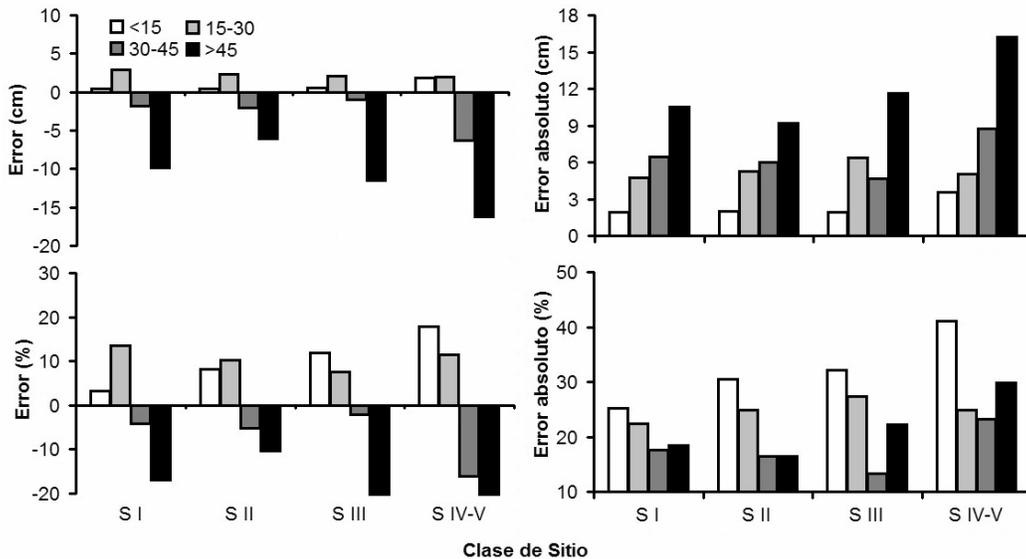


Figura 4.10. Comparación de los errores promedio y absolutos de la familia de modelos de crecimiento en diámetro (DAP) analizado en un gradiente de diámetros (DAP) para distintas clases de sitio.

Al analizar la distribución a lo largo del gradiente de clases de sitio de los distintos errores se observó que la mayor proporción de errores para todos los tipos de error se presentó en S IV-V mientras que en S I se registró la menor proporción de errores, excepto

en el EMA donde las clases de sitio intermedias (S II y SIII) presentaron la menor proporción de errores (Figura 4.11). Por otro lado, la distribución de errores se dio de manera equitativa entre las distintas clases de sitio principalmente al considerar el EMA y el $|\bar{e}|$, observándose diferencias de 11% y 7% entre el porcentaje de error de la clase de sitio que más porcentaje del error representa y la que representa menos para el EMA y el $|\bar{e}|$ respectivamente. Mientras que al considerar el EME y el \bar{e} , las diferencias entre la clase de sitio con mayor porcentaje de error y la de menor porcentaje fue de 27% y 21% respectivamente, mostrando una distribución menos equitativa.

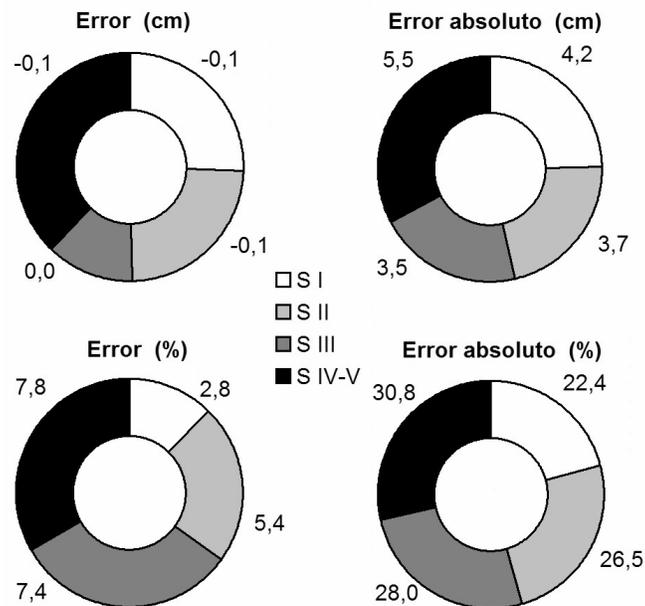


Figura 4.11. Distribución de los errores globales promedios y absolutos de la familia de modelos de crecimiento en diámetro para distintas clases de sitio.

4.3.2. Modelo Integral de crecimiento individual

El ajuste del modelo fue alto ($R^2_{aj.} = 83,02$) a pesar de que el número de variables independientes es mayor que en los modelos de la familia de funciones individuales presentadas anteriormente, y que las restricciones que tienen los datos son más grandes. Asimismo el desvío estándar de los residuales (6,0 cm) y el error medio de la estimación (0,04 cm) estuvieron dentro del rango de los errores de los modelos de la familia de funciones individuales presentadas anteriormente. Los parámetros obtenidos en el ajuste se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros y estadísticos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP).

Parámetros	Estadísticos
$a = 0,58022$	$R^2_{aj.} 83,0$
$b = 0,38395$	EME 0,04 cm
$c = 84,1835$	EMA 4,11 cm
$d = 0,15985$	ESE 6,00 cm
$e = -0,00451$	
$f = 1,3429$	
$g = -0,01114$	

Donde: $R^2_{aj.}$: coeficiente de determinación ajustado; EME: error medio de la estimación; EMA: error medio en valor absoluto; ESE: error estándar de la estimación.

La distribución de los residuos (valores observados vs predichos) del modelo integral (Figura 4.12) presentó un patrón muy similar al de las ecuaciones individuales (Figura 4.1), observándose también una distribución acampanada en la que los residuos son mayores a medida que aumenta la variable predicha.

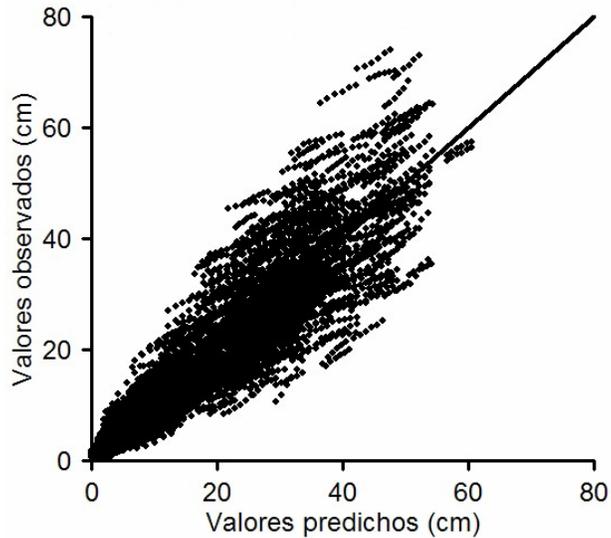


Figura 4.12. Dispersión de datos del modelo integral de crecimiento en diámetro.

El modelo obtenido tiene tres variables independientes que generan una familia de superficies de respuesta. Una de ellas se presenta en la Figura 4.13, donde puede observarse el impacto de las dos variables discretas ensayadas sobre el *DAP*. Se observó una mayor influencia de la variable clase de sitio en la mayor clase social (dominantes) respecto de la CS suprimidos, ya que el modelo determinó una mayor variación en la predicción del *DAP* entre la clase de sitio superior y la inferior en la CS dominante que en los suprimidos. Por otro lado, la variable CS tomó más relevancia en las clases de sitio superiores que en las inferiores, determinando una mayor variación entre la menor y la mayor clase social en S I que en S V.

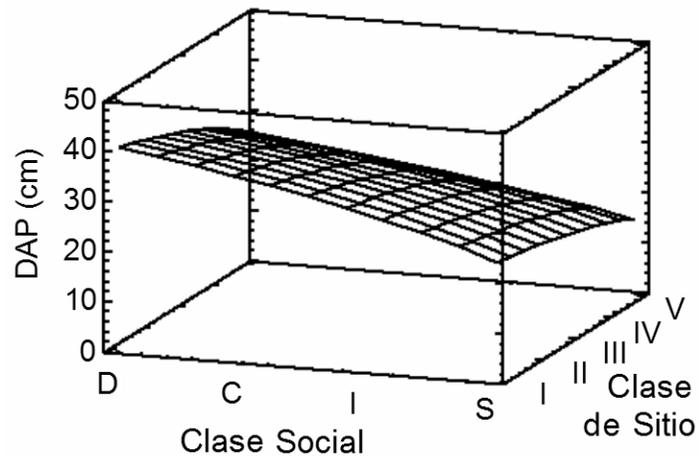


Figura 4.13. Respuesta del modelo integral de crecimiento en diámetro (*DAP*) en función de las variables independientes (clase social y clases de sitio). Donde: D: dominantes; C: codominantes; I: Intermedios; S: Suprimidos.

Al comparar las curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro (*DAP*) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio se observó una total correspondencia entre las mismas (Figura 4.14). A los 200 años los árboles dominantes presentaron valores diamétricos promedios de 60,0 – 57,0 – 53,4 – 48,6 – 41,3 cm (de S I a S V respectivamente). Los codominantes presentaron valores promedios de 53,7 – 51,1 – 47,8 – 43,6 – 37,0 cm. Los intermedios presentaron valores promedios de 46,0 – 43,7 – 40,9 – 37,3 – 31,7 cm. Y finalmente, los suprimidos presentaron valores promedios de 35,2 – 33,5 – 31,4 – 28,6 – 24,3 cm. De esta forma se observó que las curvas presentaron una declinación paulatina al aumentar la edad, al mejorar el sitio o al presentar una mejor clase social.

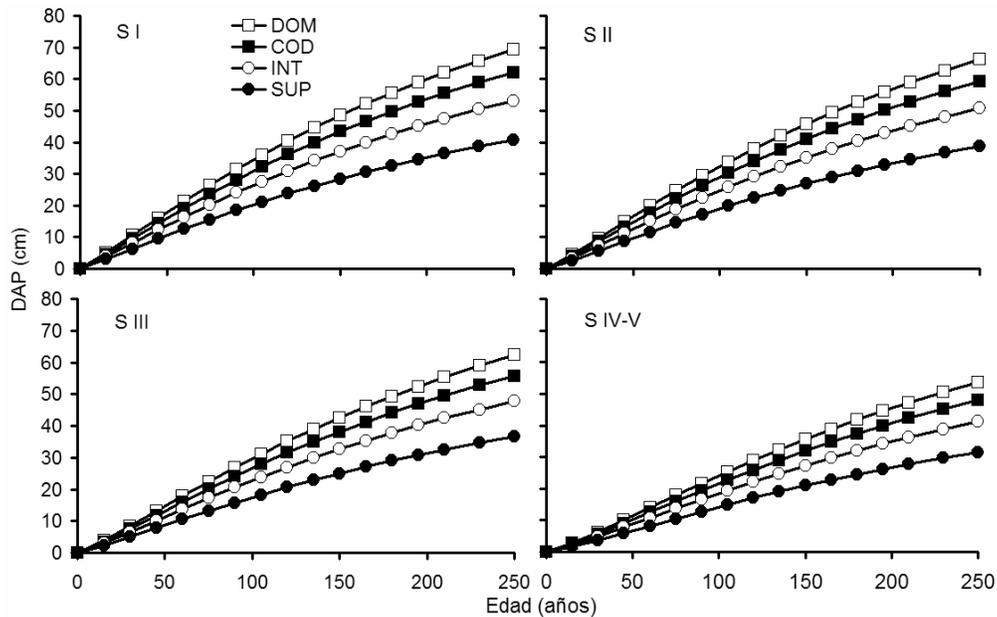


Figura 4.14. Comparación de las curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: intermedios; SUP: suprimidos.

Al comparar las curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro en gradientes de clases de sitio para diferentes clases sociales (Figura 4.15) se observó la misma correspondencia que en la Figura 4.14. La disminución progresiva de las tasas de crecimiento no fue proporcional a lo largo del gradiente de clases de sitio, tal como se observa a lo largo de un gradiente de clase sociales (Figura 4.14). La diferencia entre las clases de sitio S I y S II fue menor que la observada entre S III y S IV-V para todas las clases sociales.

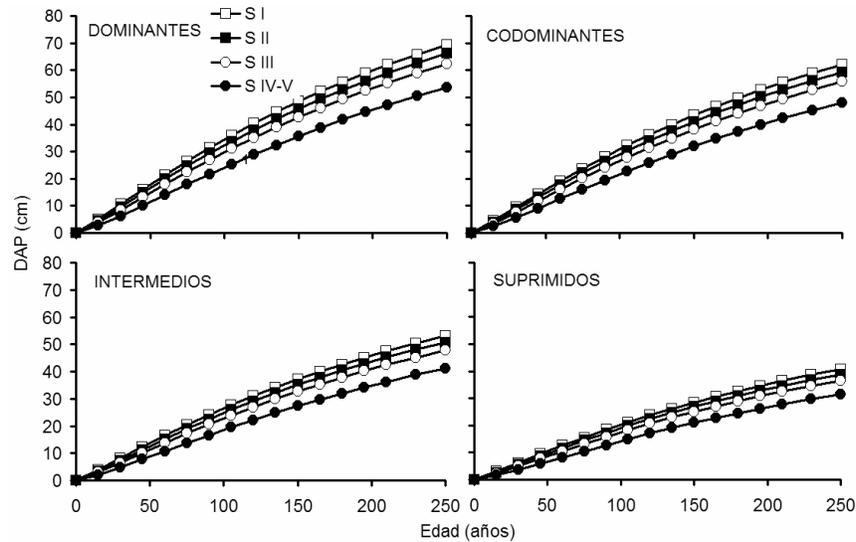


Figura 4.15. Comparación de curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio para diferentes clases sociales.

Al comparar los incrementos diamétricos del modelo integral de crecimiento en diámetro en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio y viceversa (Figuras 4.16 y 4.17) se observó una total correspondencia entre las curvas. No hay cruces de curvas ni interacciones, brindando incrementos que responden a lo esperable que ocurra en la dinámica natural de crecimiento de un rodal de un bosque primario sin intervención.

El incremento alcanza un máximo en los árboles dominantes ($0,37 \text{ cm.año}^{-1}$) en edades tempranas (25-30 años), y decrece al aumentar la edad, al empeorar el sitio o al encontrarse en una clase social inferior. Esta condición va cambiando al empeorar la clase de sitio. Los puntos de culminación para las clases de sitio de S I a S III se dan entre los 25-40 años, para S IV entre los 40-50 años y para S V dicho punto se alcanza entre los 50-60 años. Sin embargo no se presentaron corrimientos dentro de una misma clase de sitio a lo largo del gradiente de clases sociales, lo que representa una falencia para el presente modelo.

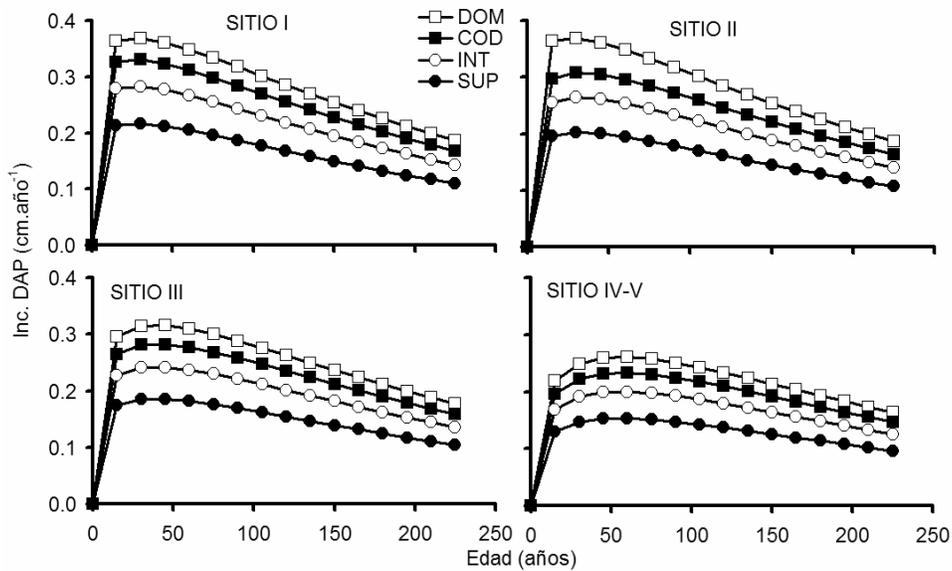


Figura 4.16. Comparación de los incrementos diamétricos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

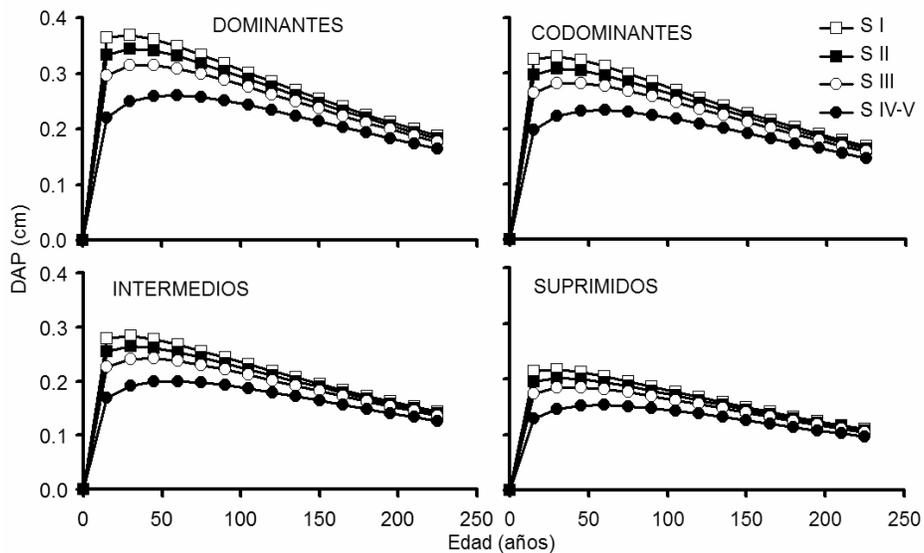


Figura 4.17. Comparación de los incrementos diamétricos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio para diferentes clases de copa.

A los buenos estadísticos obtenidos y las ventajas descritas en el comportamiento biológico del modelo, se le sumaron los bajos errores globales obtenidos. El EME fue levemente menor al calculado para la familia de funciones de crecimiento (0,04 cm), que

representó un 0,21% del valor promedio de los diámetros estimados. El EMA fue de 4,89 cm, muy similar al obtenido para la familia de funciones de crecimiento (4,11 cm), representando un 22,3% del valor promedio estimado.

Al comparar los errores promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro analizados en un gradiente de clases de sitio y clases sociales (Figura 4.18) se observó una correspondencia con la calidad de los datos descripta en el análisis del ajuste de la familia de ecuaciones de crecimiento en diámetro. El error promedio mostró un comportamiento irregular para las distintas clases sociales a los largo del gradiente de clases de sitio. Los mayores EME se registraron para la clase social codominante en las clases de sitio extremas (S I y S IV-V). Al considerar el error promedio en valor porcentual se observaron subestimaciones para todas las clases sociales y calidades de sitio excepto para los suprimidos de S III. Esto se debió a que las mayores sobreestimaciones (valores negativos) se dieron en los individuos de mayor tamaño, siendo el error porcentual, de bajo valor y obteniéndose de esta manera un error porcentual promedio positivo.

El error absoluto fue superior en la clase social dominante dentro de cada clase de sitio, disminuyendo su valor a medida que disminuyó la clase social. La clase de sitio S IV-V, presento los máximos valores de EMA para cada clase social. Por otro lado, el error absoluto en porcentaje tuvo una distribución diferente a la del error absoluto (cm). En general, los máximos errores absolutos porcentuales se presentaron en las clases sociales codominantes e intermedias, excepto en la clase de sitio S III que presentó los máximos errores en las clases sociales intermedios y suprimidos.

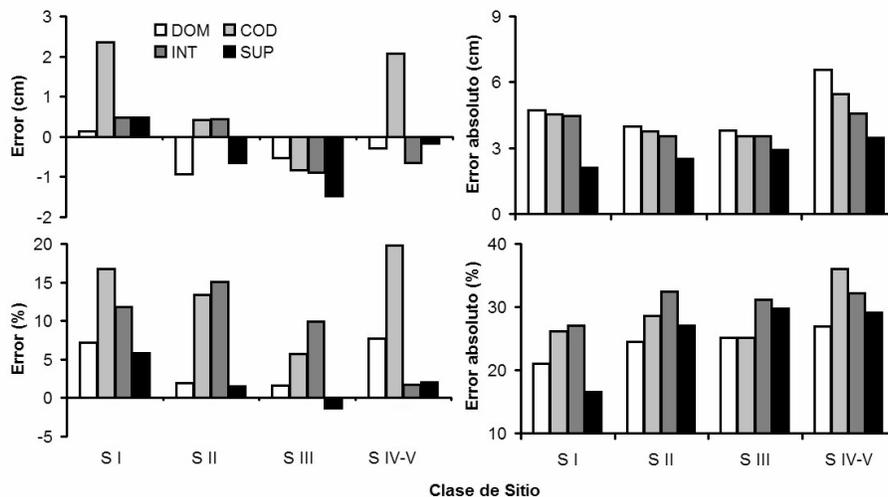


Figura 4.18. Comparación de los errores promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) analizados en un gradiente de clases de sitio y clases sociales. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: intermedios; SUP: suprimidos.

El comparar los errores promedio en cm y en porcentaje a lo largo del gradiente de clases diamétricas para las diferentes clases de sitio (Figura 4.19) se observó una distribución de errores similar a la de la familia de ecuaciones simples (Figura 4.10). En general, el EME fue positivo para los individuos de menor *DAP* y negativo para los de mayor *DAP* en todas las clases de sitio. Esta misma tendencia también se observó al analizar el $\% \bar{e}$. Por otro lado, el EMA aumentó a medida que aumentó el *DAP* en todas las calidades de sitio. Pero al analizar el error absoluto en valor porcentual, esta última tendencia se invirtió presentándose los mayores errores en las clases diamétricas inferiores (< 30 cm) y los menores valores en las clases diamétricas superiores (> 30 cm).

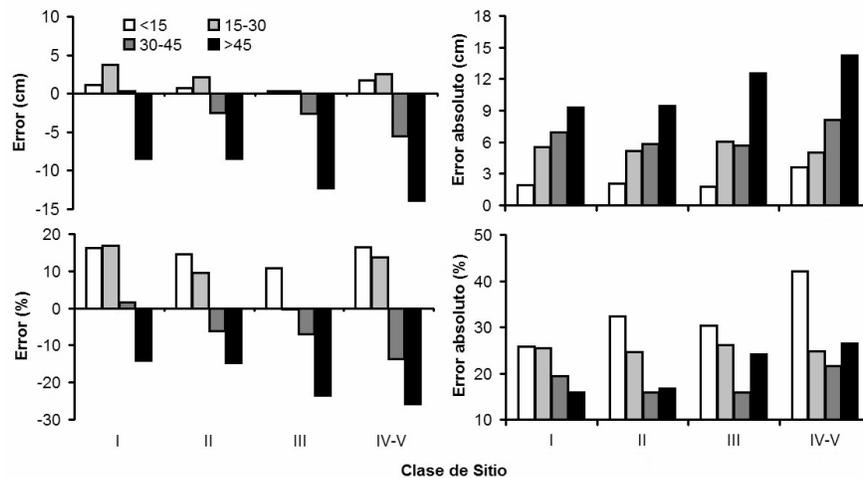


Figura 4.19. Comparación de errores promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (*DAP*) analizados en un gradientes de frecuencias diamétricas para cada clase de sitio.

Al comparar la proporción de los errores globales promedios y absolutos por clase de sitio (Figura 4.20), se observó que las menores proporciones de errores se presentaron en la clase de sitio S II mientras que los mayores errores se dieron en las clases de sitio extremas (S I y S V). Esto está en relación con la distribución de las parcelas muestreadas. Al igual que la familia de ecuaciones simples, los errores absolutos (EMA y el $\%|\bar{e}|$) presentaron una distribución más equitativa que el EME y el $\% \bar{e}$.

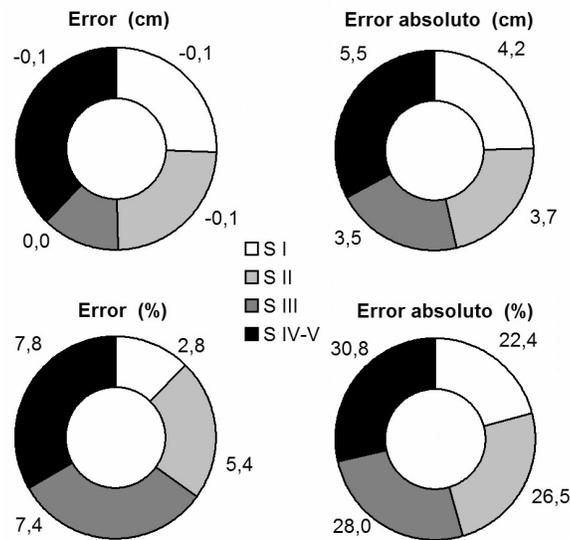


Figura 4.20. Comparación de los errores globales promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) para distintas clases de sitio.

4.4. Discusión

El uso de auto-réplicas es común en los estudios de crecimiento (Vanclay, 1994; Peri & Martínez Pastur, 1996; Martínez Pastur & Fernández, 1997; Chauchard & Sbrancia, 2003) debido a la dificultad en la obtención de las muestras. No es común la realización de muestreos considerando la inclusión de todos los individuos a nivel de rodal como el aquí presentado. La mayoría de los estudios del crecimiento forestal seleccionan árboles individuales (Klepac, 1983; Everard & Christie, 1995; Kariuki et al., 2006; DeRose & Seymour, 2009) de acuerdo a su sanidad y a otras características (e.g., dominancia, tamaño, forma). En este estudio, se empleó un método menos frecuente, donde todos los árboles que entraron en la parcela fueron incluidos en el muestreo. (Martínez Pastur et al., 2008a; Subedi & Sharma, 2011), lo que permitió ajustar modelos con mayor precisión y un buen comportamiento biológico.

Otra característica poco común del diseño empleado es el período de crecimiento incluido en los análisis (20 años). Este presenta menos autorreplicas (6 autorreplicas por árbol) que usando el gradiente completo de años de cada individuo muestreado, disminuyendo de esta manera el error de auto-correlación. En este estudio, la gran cantidad de pares de datos edad-DAP en comparación con el número de autorreplicas nos permite suponer que no hay serios problemas de correlación de datos (Vanclay, 1991; 1995; Zhao et al., 2004). Por otro lado, las parcelas estuvieron ampliamente dispersadas a nivel regional

y la correlación entre parcelas debería ser, por lo tanto, pequeña. Por este motivo, asumimos que no existe correlación espacial en los modelos ajustados (Zhao et al., 2004).

Durante los últimos años, en las ciencias forestales, se han propuesto una mayor cantidad de modelos de crecimiento con más variables independientes (Lessard et al., 2001; Weiskittel et al., 2007), que consideran factores tanto a nivel rodal como individual (e.g. calidad de sitio del rodal o clase social de los árboles). Un ejemplo satisfactorio fue la evolución de las propuestas de modelos de altura para la estimación de la calidad de sitio. La mayoría de esas propuestas estuvieron basadas en la ecuación de Richards (1959), donde la edad de los árboles define la altura, pero cada tipo de rodal necesita una ecuación distinta. Ek (1971) propuso una ecuación modificada donde las variables independientes fueron la edad y el índice de sitio. Esta última propuesta definió un modelo que puede ser usado en un amplio rango de condiciones de rodal. Luego, otros autores (Payandeh & Wang, 1994; Wang & Payandeh, 1994) propusieron modificaciones para incrementar la precisión en las estimaciones. Esta última metodología fue aplicada satisfactoriamente en diversos bosques del hemisferio norte (Chen et al., 1998; Tewari & Kumar, 2002) así como también fue utilizada en los bosques de Patagonia Sur, e.g., en *N. antarctica* (Cápitulo II) y en *N. pumilio* (Martínez Pastur et al., 1997). También los modelos integrales basados sobre esas propuestas fueron aplicados para la predicción del volumen en *N. antarctica* (Lencinas et al., 2002), del diámetro individual (Martínez Pastur et al., 2005) y del crecimiento volumétrico a nivel rodal (Martínez Pastur et al., 2008a) en bosques de *N. pumilio*.

El ajuste de los modelos en las ciencias forestales está relacionado a la variabilidad estructural, siendo mayor en los bosques naturales sin intervenciones silviculturales (Zeide, 1978). El ajuste de los modelos estudiados es comparable a los encontrados en la bibliografía. Subedi & Sharma (2011) presentaron modelos de crecimiento diamétricos para *Picea mariana* y *Pinus banksiana* obteniendo R^2 entre 69% y 76% respectivamente, y Lhotka & Loewenstein (2011) propusieron modelos integrales para varias especies de *Quercus* con R^2 entre 40% y 57%. La familia de ecuaciones de crecimiento diamétrico presentada en la presente tesis mostró una gran variabilidad en su $R^2_{aj.}$, explicando entre 54% y 92% en cada modelo. La ecuación global de crecimiento diamétrico que incluyó más variables, presentó un ajuste similar a las mejores ecuaciones de la familia de modelos. En términos generales se observó un ajuste similar entre los dos tipos de modelos. Esto se manifestó también en los gráficos de valores observados vs. predichos que presentaron tendencias iguales (Figuras 4.1 y 4.12). En ambas figuras se observaron algunos datos correspondientes a los mayores *DAP* predichos que estuvieron muy por encima de la recta media. Es probable que estos individuos vieran favorecido el crecimiento de sus copas por haber sido árboles remanentes en aprovechamientos pasados o microvolteos de viento, lo que podría determinar un aumento en su crecimiento diamétrico (Fox et al., 2008). De

acuerdo a nuestros resultados, la unificación de una familia de modelos simples de crecimiento en una ecuación integral no influye fuertemente sobre el ajuste y precisión de la estimación.

El modelo de Richards es una función sigmoidea flexible y muy ampliamente usada en el modelado del crecimiento en varias especies forestales alrededor del mundo (Zeide, 1993; Khamis et al., 2005; Upadhyay et al., 2005; Mamo & Sterba, 2006). Sin embargo, esta flexibilidad incrementa el riesgo de obtener un mal comportamiento biológico en los modelos ajustados. La familia de modelos simples de crecimiento presenta una serie de inconsistencias entre modelos y a lo largo de los gradientes estudiados (e.g., calidad de sitio de los rodales y clase social de los árboles). El modelo integral, que fue ajustado con la misma base de datos, mostró un mejor comportamiento biológico sin presentar esas inconsistencias. Otra inconsistencia fue observada en el punto de máximo incremento anual y su edad de ocurrencia, el cual es esperado que ocurra con anterioridad en aquellos individuos que crecen en mejores condiciones (Klepac, 1983). De acuerdo a Hyink & Zedaker (1987) el punto de máximo incremento suele ocurrir con anterioridad en los individuos pertenecientes a las mejores calidades de sitio. Resultados similares fueron descritos para diferentes especies del género *Nothofagus* (Peri & Martínez Pastur, 1996; Martínez Pastur & Fernández, 1997; Capítulo II). El modelo integral presentó una mejor correspondencia entre los puntos de máximo incremento anual que la familia de modelos simples.

Cabe considerar que los incrementos diamétricos registrados en el presente análisis corresponden a individuos creciendo en rodales con una densidad cercana a la máxima densidad relativa. Por lo que los valores obtenidos a partir de la utilización de los modelos, es de esperar que sean menores a los que puedan presentar rodales bajo algún régimen de manejo forestal en el que la densidad sea menor. Tal como se ha documentado para bosques de diferentes especies, en las que a menores densidades se registran mayores crecimientos diamétricos (Vanclay & Sands, 2009; Zeide, 2001).

4.5. Conclusiones particulares

El modelo integral de crecimiento en diámetro constituye una herramienta más simple para el apoyo en la toma de decisiones en el manejo forestal que el empleo de las familias de modelos de crecimiento. El uso de las ecuaciones integrales: (i) simplifica los cálculos, (ii) no influye en gran medida el ajuste ni la precisión de la estimación, y (iii) produce un mejor comportamiento biológico de la estimación. El modelo integral propuesto, con una mayor complejidad y un mayor número de variables independientes permite a los usuarios explicar

el crecimiento diamétrico de los bosques de ñire en un amplio rango de condiciones ambientales como las presentes a lo largo de su distribución en Patagonia Sur.

CAPÍTULO V

Desarrollo de modelos a escala de individual y de rodal para la predicción del volumen

5.1. Introducción

El cálculo de la productividad forestal se realiza usualmente a través del volumen que aportan los árboles del bosque. Es conveniente, realizar los cálculos basados en el volumen total de los árboles cuando el estudio no está destinado a un producto determinado, o bien en el volumen aprovechable o su materia prima derivada, cuando el estudio está orientado al aprovechamiento de un producto comercial específico. Cabe considerar que el rendimiento de un bosque, entendiendo el rendimiento como una relación entre material leñoso aprovechable y el volumen total, varía en función de las necesidades del mercado actual y la tecnología disponible. Por ejemplo, en Tierra del Fuego solo se destina a la industria del aserrado una determinada calidad y tamaño de trozas que representa un 30-40% del volumen apeado durante los aprovechamientos (Martínez Pastur et al., 2000). Sin embargo, en otros países más industrializados (e.g. Suecia) se cosechan trozas para la industria del aserrado, trozas para la industria del papel, y ramas, follaje y tocones para la producción de energía a partir de biomasa (Gustafsson et al., 2012).

Como el volumen es muy difícil de medir en forma directa, la mayoría de las veces la productividad forestal se estima a partir de alguna de las variables altamente correlacionadas con el mismo (Gregoire et al., 1986; Wiant et al., 1992), pudiendo ser variables de árboles individuales (e.g., diámetro o altura de los árboles) o de rodal (e.g., densidad o grado de ocupación del bosque, como el área basal). Los datos para el cálculo de la productividad se obtienen durante el inventario forestal, donde se conjugan la eficiencia en el muestreo y la precisión en los resultados (Husch et al., 1982), y representan la mayor parte de los gastos para este tipo de estudios. Es por ello, que se debe tener en cuenta para que se usarán los datos que se midan durante los inventarios de campo y en que modelos se emplearán, considerando complejidad y precisión.

Los modelos biométricos permiten una gran versatilidad en el cálculo del volumen, adaptándose a diferentes problemáticas y situaciones particulares. Los modelos de volumen pueden clasificarse como *locales*, cuando el volumen está en función de una sola variable, como el diámetro, o *estándares*, cuando el volumen está en función de dos o más variables, usualmente el diámetro y la altura total (Prodan et al., 1997). Se han desarrollado numerosas ecuaciones de volumen basadas en el estudio de la morfometría de los árboles (e.g., Martínez

Pastur et al., 1993; Fucaraccio et al., 1999). Asimismo, los modelos de volumen se pueden clasificar en modelos individuales ($\text{m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$) o de rodal ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Sin embargo antes de elegir un modelo hay que definir los criterios de selección, que pueden resumirse a partir de: (1) si se incluye un mayor número de variables relacionadas en un modelo, mejor será el ajuste del mismo; (2) cuantas más variables posea un modelo, mayor será el costo del trabajo de campo durante la toma de datos; y (3) si las variables son de difícil medición o estimación, aumentará la imprecisión del modelo debido a los errores en la toma de datos.

La mayor problemática relacionada con el cálculo del volumen se resume en la incorrecta selección y empleo de los modelos. Por otra parte, los modelos deben ajustarse para cada uso y sitio en particular, ya que varía fuertemente lo que se quiere estimar (en este caso el volumen) de un lugar a otro, y se incorporan enormes errores de cálculo si se utiliza en forma extensiva una ecuación diseñada para un uso específico determinado. Es por ello, que al elegir un modelo se deben tener en cuenta los límites de su utilización en función del muestreo realizado y de la biología del modelo, que debe representar fehacientemente la biología de la especie bajo análisis.

La bibliografía es muy amplia en lo que se refiere a modelos de volumen en *Nothofagus* para la región Andino-patagónica, desde tablas y modelos locales (Mutarelli et al., 1968; Schmidt & Urzúa, 1982; Orfila, 1987; Chauchard, 1991a; Uriarte & Groose, 1991; Carabelli, 1991; Fernández et al., 1995; Fucaraccio et al., 1999) hasta modelos estándares tradicionales (Martínez Pastur et al., 1993; 1995; Peri, 1995; Fucaraccio et al., 1999) y no tradicionales (Peri et al., 1997), realizados principalmente para *N. pumilio*. Los modelos seleccionados por los diferentes autores han sido muy variables, atendiendo a diversos criterios de selección. En bosques de *N. antarctica*, si bien existen pocos antecedentes sobre modelos de volumen, se han desarrollado algunas ecuaciones locales (Fernández et al., 1995; Gyenge et al., 2009), así como ecuaciones estándar tanto tradicionales como no tradicionales (Martínez Pastur et al., 1995; Lencinas et al., 2002). Sin embargo aún no se han publicado ecuaciones a nivel rodal para estos bosques.

Objetivos particulares

En el presente capítulo se analiza la construcción y alcance de distintos tipos de modelos para predecir el volumen tanto a nivel individual como de rodal. Se evaluarán las diferentes alternativas de modelos volumétricos a partir de la bondad de ajuste, la capacidad predictiva, el comportamiento biológico y la practicidad en la construcción y su posterior uso.

5.2. Materiales y Métodos

Se ajustaron modelos para predecir el volumen a nivel individual y a nivel rodal. Las diferentes ecuaciones seleccionadas, difieren en el tipo y la cantidad de variables que las componen, ajustándose de esta manera ecuaciones que requieren diferentes bases de datos y distintas variables independientes. Para una mayor comprensión, el presente capítulo se dividió en modelos individuales y modelos de rodal.

5.2.1. Modelos individuales

Toma de la muestra y análisis de los datos: Se trabajó con datos provenientes de 22 sitios de muestreo de Tierra del Fuego y Santa Cruz, a lo largo de un amplio rango de calidades de sitio (desde la clase de sitio V a I) y de diámetros (hasta 67 cm de DAP).

En cada sitio se seleccionaron entre 10 y 48 individuos de manera de cubrir el rango diamétrico presente. A cada individuo se le mensuró el diámetro normal a 1,3 m de altura (DAP), la altura total (HT), la clase social y diámetros cada un metro a lo largo del fuste. Asimismo, se calculó el volumen total incluyendo la corteza (VTCC), el tocón y una punta fina de hasta 5 cm sobre el fuste. La determinación de los volúmenes parciales se realizó mediante la fórmula de Smalian (Cailliez, 1980; Clutter et al., 1983). También se determinó la calidad de sitio de cada rodal a partir de su altura dominante utilizando la ecuación de índice de sitio de Newnham previamente ajustada (Capítulo II).

Evaluación y validación de los modelos: La evaluación de las distintas ecuaciones locales se realizó a partir de la interpretación gráfica de sus curvas, así como también a partir de su análisis estadístico. Para el análisis estadístico se consideró el coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj), así como el error estándar de la estimación (ESE), el error medio de la estimación (EME), el error medio absoluto (EMA), el error medio porcentual ($\% \bar{e}$), y el error medio porcentual en valor absoluto ($\% |\bar{e}|$) que se expresan de acuerdo a las funciones que ya fueron presentadas en el apartado 2.2.4. También se realizaron análisis de los residuales a lo largo de gradientes de distintas variables.

5.2.1.1. Ecuaciones locales

Familia de ecuaciones locales: En este primer análisis se realizó una familia de ecuaciones locales (una ecuación por rodal muestreado), utilizando como modelo base al sugerido por Fernández et al. (1995), ajustado por técnicas de regresión no lineal. Este modelo es una

simplificación del modelo de Schumacher-Hall (1933):

$$VTCC = a DAP^b \quad [1]$$

Donde VTCC es el volumen total con corteza (m³), DAP el diámetro normal a 1,30 m (cm) y a y b coeficientes del modelo.

Este modelo cuenta con dos parámetros para ajustar. El parámetro b afecta al DAP y es de esperar que arroje una magnitud cercana a 2, tal como ocurre en el cálculo del área basal. Por otra parte, el parámetro a absorbe la mayor parte de las variaciones de la altura total y de la forma, así como de los valores correspondientes a la compensación de las unidades. Este modelo se caracteriza por responder favorablemente a una gran variedad de sitios y mantener las propiedades biológicas en las predicciones.

Otra forma de poder comparar el ajuste del modelo de ecuaciones locales en diferentes rodales, es fijar el valor del parámetro b . Lencinas et al. (2002) utilizaron un valor fijo de 2, a través de un modelo polinomial llamado de Bertkhout (Loetsch et al., 1973), ya que es el valor esperado para la variable. En la presente tesis, se prefirió usar como valor fijo de b al obtenido al promediar los parámetros b de todas las ecuaciones locales ajustadas, para poder hacer una comparación entre todos los sitios muestreados.

5.2.1.2. Ecuaciones locales integradas

Una nueva propuesta de ecuación estándar no tradicional basada en resultados obtenidos a partir de una familia de ecuaciones locales fue propuesta por Lencinas et al. (2002) para *Nothofagus antarctica*. Mediante esta propuesta se propone como metodología realizar una regresión no lineal entre los coeficientes de los modelos locales y un valor que refleje la calidad de sitio, mediante la siguiente función:

$$a = a' \cdot IS_{50}^{b'} \quad [2]$$

Donde a : nuevo coeficiente de la ecuación (1) para un determinado IS_{50} ; a' y b' : parámetros de la ecuación, IS_{50} : índice de sitio edad base de 50 años (m).

De esta forma la ecuación local utilizada para el modelo [1] se transforma en una ecuación estándar, ya que incorpora al IS_{50} como variable predictora. Por lo tanto, el modelo final queda definido como:

$$VTCC = \left(a' \cdot IS_{50}^{b'} \right) \cdot DAP^b$$

[3]

Donde $VTCC$: volumen total con corteza (m^3); DAP : diámetro normal a 1,30 m (cm); IS_{50} : índice de sitio con edad base de 50 años (m); a' y b' : coeficientes de la ecuación (2); b : valor promedio de los coeficientes b de los modelos locales previamente ajustados.

Esta última ecuación ensayada [3] se compone de la unión de una ecuación local [1] y la ecuación [2], por lo que no pueden obtenerse estadísticos de bondad de ajuste para el modelo global. Es por ello que los estadísticos no se pueden comparar con los de las ecuaciones anteriores, por la naturaleza distinta en el ajuste, ya que en los primeros se evalúa el comportamiento del volumen frente a las variables correlacionadas, mientras que en el segundo se examina el ajuste de los coeficientes del modelo [2] con los índices de sitio (IS_{50}). Por este motivo la evaluación de este modelo solo se realizó a partir de una autovalidación calculando el ESE, EME, EMA, $\% \bar{e}$ y $\% |\bar{e}|$ a lo largo de un gradiente de clases de sitio.

5.2.1.3. Ecuaciones estándar tradicional y no tradicional

Para el ajuste de las ecuaciones estándar se utilizó el mismo set de datos ($n = 423$) que la de los modelos locales, pero integrados en una sola base de datos.

5.2.1.3.1. Ecuación estándar tradicional

Se seleccionó el modelo de *Schumacher-Hall* por responder favorablemente a un gran número de especies forestales (Gregoire et al., 1987; Pimentel Gomes & García, 1993; Knowe et al., 1997), incluyendo a *N. antarctica* (Martínez Pastur et al., 1995; Lencinas et al., 2002) y a *N. pumilio* en estudios previos (Peri et al., 1997). Las propiedades matemáticas de este modelo simulan el comportamiento biológico teórico esperado (Pimentel Gomes & García, 1993), donde el coeficiente a absorbe gran parte de las variaciones debidas a la forma de los árboles, e incluye la constante π y los cambios de unidades. El coeficiente b potencia al diámetro con un valor esperado cercano a 2, y el coeficiente c potencia a la altura con un valor esperado cercano a la unidad. De este modo, el producto de las unidades de las variables dependientes se acerca a la expresión de la variable independiente (m^3). El modelo se ajustó mediante técnicas de regresión no lineal, y se expresa como:

$$VTCC = a \cdot DAP^b \cdot HT^c \quad [4]$$

Donde a , b , c : coeficientes del modelo; VTCC: volumen total con corteza (m³); DAP: diámetro normal a 1,30 m (cm); HT: altura total del árbol (m).

Este modelo utiliza como variables predictoras al diámetro y la altura del árbol. La primera es de usual medición durante los inventarios forestales, mediante una forcípula o una cinta con un error cercano al $\pm 0,5$ cm (Prodan et al., 1997). No sucede lo mismo con la altura de los árboles. Es común que se incluya un valor de la altura dominante del rodal (60 - 100 individuos dominantes más altos por hectárea), pero rara vez se miden todas las alturas de los individuos de la parcela de muestreo. Por otra parte, su medición es imprecisa cuando se hace en árboles en pie por medio de clinómetros o instrumentos especialmente diseñados a tal fin, por ejemplo, el *Impulse* de *Laser Technology Inc.* Si bien los instrumentos miden con precisiones cercanas a $\pm 0,5$ m, los errores observados en árboles medidos en pie y volteados llegan hasta 3 m de sobre estimación, debido principalmente a la inexperiencia de los técnicos. Estos errores dependen de la altura de los árboles y del cerramiento de copas del dosel superior del bosque.

5.2.1.3.2. Ecuación estándar no tradicional

Se ensayó un modelo no tradicional, que fue desarrollado en su forma original por Peri et al. (1997) para *N. pumilio*. El mismo utiliza una clasificación de clases de sitio compuesta por cinco clases según el IS_{50} . La mayor clase de sitio (S I) posee una altura dominante mayor a los 9,3 m a los 50 años de edad y la menor clase de sitio (S V) presenta una altura dominante menor a los 3,6 m a los 50 años de edad. El modelo se resolvió mediante técnicas de regresión no lineal, y se expresa de la siguiente forma:

$$VTCC = a \cdot (6 - S)^b \cdot DAP^{c \cdot (6 - S)^d} \quad [5]$$

Donde a , b , c , d : coeficientes del modelo; VTCC: volumen total con corteza (m³); DAP: diámetro normal a 1,30 m (cm); S: clase de sitio (de I a V incorporándose en la ecuación como números arábigos).

El desarrollo de este modelo está inspirado en los modelos de crecimiento diseñados para la construcción de ecuaciones que predicen el incremento en diámetro o en altura (Payandeh & Wang, 1994; Vanclay, 1994; Wang & Payandeh, 1994a). En este caso la variable

de mayor importancia para la predicción del volumen es el diámetro, que es ponderada por la calidad de sitio, tanto en los coeficientes que multiplican a la base como a los del exponente.

5.2.2. Modelos de rodal

Descripción de la muestra y análisis de los datos:

La obtención de datos de VTCC utilizados para desarrollar los modelos de rodal provienen del muestreo de parcelas diámetro variable ya explicado en el capítulo III (Apartados 3.2.1. y 3.2.2.). A cada individuo incluido en el muestreo se le estimó el volumen total con corteza mediante la ecuación estándar tradicional [4] previamente ajustada. A partir de esta información se determinó el VTCC por hectárea ($m^3 \cdot ha^{-1}$) para cada parcela.

5.2.2.1. Ecuaciones de relación volumen total / área basal ($m^3 \cdot m^{-2}$)

En un primer análisis se ensayó un modelo de relación basado en la ecuación [5] del modelo de volumen individual estándar no tradicional. La variable independiente de mayor peso es la edad del rodal coetáneo (años), que es ponderada por el índice de sitio (IS_{50} en m). El modelo se expresa de la siguiente forma:

$$Rel VTCC / AB = a \cdot (IS_{50})^b \cdot Edad^{c \cdot (IS_{50})^d} \quad [6]$$

Donde a , b , c , d : coeficientes del modelo; Rel VTCC / AB: relación entre el volumen total y el área basal del rodal ($m^3 \cdot m^{-2}$); Edad: edad del rodal (años); IS_{50} : índice de sitio con edad base de 50 años (m).

Por otra parte, se ensayaron modelos de reconocido comportamiento biológico, que se adaptan a una enorme variedad de estudios, utilizados principalmente en análisis de crecimiento (Clutter et al., 1983; Vanclay, 1994; Hari, 1996; Martínez Pastur & Fernández, 1997; Díaz et al., 1998; Peri & Martínez Pastur, 1996; 1998). Se ensayaron dos funciones. La primera es el modelo de Chapman-Richards, desarrollado por Michaelis & Menten, 1913) y posteriormente generalizado por Richards (1959). Se caracteriza por su base biológica, su flexibilidad y exactitud (Rayn8er, 1991; Zeide, 1993). La segunda es la de Weibull, también reconocido por ser un modelo versátil, siendo una modificación del anterior (Zeide, 1993). Sin embargo, estos modelos se debieron adaptar a las variables independientes elegidas, por lo que se usó una extensión de dichos modelos propuesta por

Ek (1971), de uso generalizado en la construcción de curvas polimórficas (Payandeh & Wang, 1994; Wang & Payandeh, 1994). Los modelos adoptan las siguientes formas:

a) Chapman-Richards:

$$\text{Rel VTCC} / \text{AB} = \left(a \cdot \left(\text{IS}_{50}^b \right) \right) \cdot \left(1 - e^{(c \cdot \text{Edad})} \right)^{\left(d \cdot \left(\text{IS}_{50}^e \right) \right)} \quad [7]$$

b) Weibull:

$$\text{Rel VTCC} / \text{AB} = \left(a \cdot \left(\text{IS}_{50}^b \right) \right) \cdot \left(1 - e^{(c \cdot \text{Edad})} \right)^{\left(d \cdot \left(\text{IS}_{50}^e \right) \right)} \quad [8]$$

Donde a , b , c , d , e : coeficientes del modelo; Rel VTCC / AB: relación entre el volumen total con corteza y el área basal del rodal ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2$); Edad: edad del rodal (años) y IS_{50} : índice de sitio con edad base de 50 años (m).

Los ajustes se realizaron mediante técnicas de regresión no lineal. Al igual que en las ecuaciones de volumen individual, la evaluación estadística se llevó a cabo por medio del coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$), el error estándar de la estimación (ESE) y el error medio de la estimación (EME). Por otra parte, se llevó a cabo una autovalidación utilizando la misma base de datos, realizando un análisis de los errores porcentuales promedio ($\% \bar{e}$) y en valor absoluto ($\% |\bar{e}|$) a través de rangos de edad y calidad de sitio. Mediante la autovalidación, se contrastaron los ajustes a lo largo de los gradientes ya mencionados, tanto de los modelos de relación basados en Chapman-Richards y en Weibull, como del modelo basado en a ecuación estándar no tradicional.

Para utilizar estos modelos, los valores obtenidos de Rel VTCC / AB deben ser multiplicados por el área basal del rodal. En el presente capítulo se optó por seleccionar el modelo de Relación que presentó el mejor ajuste, para determinar los valores de VTCC por hectárea a partir de la multiplicación de los valores de Rel VTCC / AB por el AB promedio a lo largo de los gradientes de índice de sitio y de edades de rodal.

5.2.2.2. Ecuación de uso práctico

Se ajustó un modelo de uso práctico para ser utilizado en rodales creciendo en fases de crecimiento avanzadas (> 120 años), eliminando la variable Edad dentro del ajuste (Vukasovic et al., 2004). En el ajuste de este modelo se considera que la relación VTCC / AB no varía en rodales a partir de edades mayores a los 120 años. Esto debido a que los árboles mayores de dicha edad ya no crecen significativamente en altura.

Para el ajuste de este modelo se utilizó la misma base de datos que la que se utilizó para los modelos de relación VTCC / AB, pero seleccionando solo las parcelas que superaron los 120 años.

Este modelo predice el VTCC ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) a partir del área basal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$) y la clase de sitio (valores I a V ingresados como números arábigos). El modelo basado en la ecuación del modelo volumen individual estándar no tradicional [5] adopta la siguiente forma:

$$VTCC = a \cdot (6 - S)^b \cdot AB^{c \cdot (6 - S)^d} \quad [9]$$

Donde a , b , c , d : coeficientes del modelo; VTCC: volumen total con corteza del rodal ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), AB: área basal del rodal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$); S: clase de sitio del rodal (I a V en números arábigos).

5.2.2.3. Ecuación de relación de Incremento volumétrico / área basal

Finalmente, se ajustó un modelo para predecir la relación incremento volumétrico / área basal (Rel Inc VTCC / AB) que está basado en modelos desarrollados previamente (Peri & Martínez Pastur 1996; Martínez Pastur et al., 1997) donde la variable independiente edad es afectada en forma multiplicativa y exponencial por la calidad de sitio, quedando definida como:

$$Rel\ Inc\ VTCC / AB = a \cdot (6 - S)^b \cdot Edad^{c \cdot (6 - S)^d} \quad [10]$$

Donde a , b , c , d : coeficientes del modelo, Rel Inc VTCC / AB: relación incremento volumétrico / área basal ($\text{m}^3.\text{m}^2.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$), AB: área basal del rodal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), S: clase de sitio del rodal (I a V en números arábigos); Edad: edad del rodal (años).

Para el ajuste de este modelo, la base de datos se generó a partir del análisis de las muestras de barreno obtenidas en el muestreo explicado en el apartado 5.2.2.. A partir de la muestra de barreno de cada árbol muestreado se midió el incremento diamétrico en periodos de 4 años para los últimos 20 años de crecimiento. A partir del incremento diamétrico de cada período de tiempo y el crecimiento en altura modelado de cada árbol se calculó el incremento anual en volumen total con corteza (Inc VTCC) por hectárea de cada rodal, que dividido por el área basal permitió obtener la relación incremento volumétrico / área basal (Rel Inc VTCC / AB) de cada rodal en $\text{m}^3.\text{m}^2.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$.

5.3. Resultados

5.3.1. Modelos individuales

Los 22 sitios de muestreo cubrieron el gradiente de calidades de sitio registrándose valores de IS_{50} de 3,3 (S V) hasta IS_{50} de 10,9 (S I). Las clases de sitio más frecuentes fueron las intermedias (S II, S III y S IV) mientras que S I y S V solo contaron con dos y una parcela respectivamente. Los diámetros medios registrados variaron desde los 11 cm hasta valores superiores a los 30 cm quedando representadas en el muestreo desde las fases de desarrollo juveniles hasta las adultas. La variabilidad promedio de los diámetros registrados en todas las parcelas fue de ± 11 cm.

Tabla 5.1. Características de la muestra y límites de uso de los modelos ajustados.

Lugar	Lat	Long	IS ₅₀	n	DAP (cm)	DAPmin (cm)	DAPmax (cm)	DE (cm)
Viamonte	54°10'	67°18'	3,3	15	18,9	8,9	30,1	6,1
La Despedida	54°19'	68°30'	4,0	31	20,6	7,0	32,8	6,7
Fueguina	54°25'	66°36'	4,6	16	20,9	8,8	36,8	8,5
Inés	54°09'	67°02'	4,6	10	17,5	13,3	20,5	2,2
Inés1	54°10'	67°02'	7,1	16	28,2	10,6	56,8	12,6
Buenos Aires	54°10'	67°33'	4,6	15	26,2	7,0	53,1	12,9
María Cristina	54°24'	67°10'	4,7	12	22,9	11,7	36,5	7,6
La Costancia	54°03'	68°15'	5,3	15	20,6	8,0	37,1	8,5
San Justo	54°06'	68°33'	7,1	15	21,2	7,4	38,1	8,0
Río Ewan	54°15'	67°14'	7,3	14	26,1	11,4	56,3	11,9
Río Ewan1	54°13'	67°16'	9,2	23	26,2	8,8	42,8	10,6
Rivadavia	54°18'	67°19'	7,9	17	26,8	8,5	50,0	11,0
Irigoyen	54°30'	66°36'	8,1	15	31,7	9,8	60,9	13,4
Rolito	54°18'	67°01'	9,2	21	24,3	7,2	50,4	12,6
Los Cerros	54°21'	67°51'	7,9	16	31,5	14,1	54,6	12,2
C. Carreras	52°13'	72°14'	8,1	23	11,7	5,1	19,8	3,2
C. Carreras1	52°17'	72°10'	9,2	25	12,3	3,5	27,5	6,1
C. Carreras2	52°17'	72°14'	10,7	18	22,9	6,5	42,0	13,0
Nibepo Aike	51°21'	72°42'	4,4	13	23,0	11,0	35,5	8,0
Nibepo Aike1	51°21'	72°40'	6,2	16	29,6	14,5	44,5	8,7
Nibepo Aike2	51°22'	72°40'	9,0	29	34,2	14,0	67,0	13,0
San Pablo	54°22'	66°42'	10,9	48	12,0	4,3	28,8	4,5
Total			7,0	423	22,3	3,5	67,0	11,5

Donde: Lat: latitud, Long: longitud, IS₅₀: índice de sitio a la edad base de 50 años, S: clase de sitio; n: número de individuos muestreados; DAP: diámetro medio normal a 1,30 m; DE: desvío estándar.

La muestra discriminada de acuerdo a los límites de uso y cantidad de datos se presenta en las Tablas 5.2 y 5.3. De acuerdo a la distribución de los datos por clases de diámetro y altura, los mismos estarían cubriendo casi todo el rango posible para la especie (Tabla 5.2). El muestreo no incluyó individuos menores a 7,5 m de HT con más de 45,0 cm de DAP debido a que raramente un árbol de tan poca altura alcanza los 45 cm de DAP. En este mismo sentido, también fueron pocos los individuos muestreados con HT mayores a los 10 m y DAP menores a 15 cm.

Tabla 5.2. Distribución de la muestra utilizada para la construcción de los modelos estándares distribuidos por frecuencias de diámetro y altura.

DAP (cm)	HT (m)				Total
	< 4,9	5,0 - 7,4	7,5 - 10,0	> 10,0	
< 14,9	44	42	38	11	135
15,0 - 29,9	14	62	61	44	181
30,0 - 44,9	1	9	19	57	86
> 45,0	0	0	3	18	21
Total	59	113	121	130	423

Donde: DAP: diámetro normal a 1,30 m; HT: altura total.

Los individuos menos frecuentes fueron los de mayor tamaño (> 45 cm) y los pertenecientes a la calidad de sitio más baja (Tabla 5.3), estando ausentes en el muestreo los árboles de clase de sitio V con más de 45 cm de DAP. Sin embargo, el muestreo posee una mayor cantidad de repeticiones en el resto de las clases diamétricas medidas, las cuales son las más frecuentes en los bosques de ñire (ver capítulo III).

Tabla 5.3. Distribución de la muestra utilizada para la construcción de los modelos estándares distribuidos por frecuencias de diámetro y clase de sitio.

DAP (cm)	S I	S II	S III	S IV	S V	Total
< 14,9	44	19	30	35	7	135
15,0 - 29,9	25	47	39	59	11	181
30,0 - 44,9	16	47	6	15	2	86
> 45,0	9	7	3	2	0	21
Total	94	120	78	111	20	423

Donde DAP: diámetro normal a 1,30 m; S: clase de sitio.

Los datos presentaron un mismo comportamiento del VTCC frente al DAP (Figura 5.1). Se observó un crecimiento exponencial del volumen a medida que aumentó el diámetro, quedando el valor del mismo y la forma que asume la dispersión directamente relacionados a la calidad de sitio. En sitios de calidad buena (S I) la pendiente fue mayor que en sitios bajos (S V).

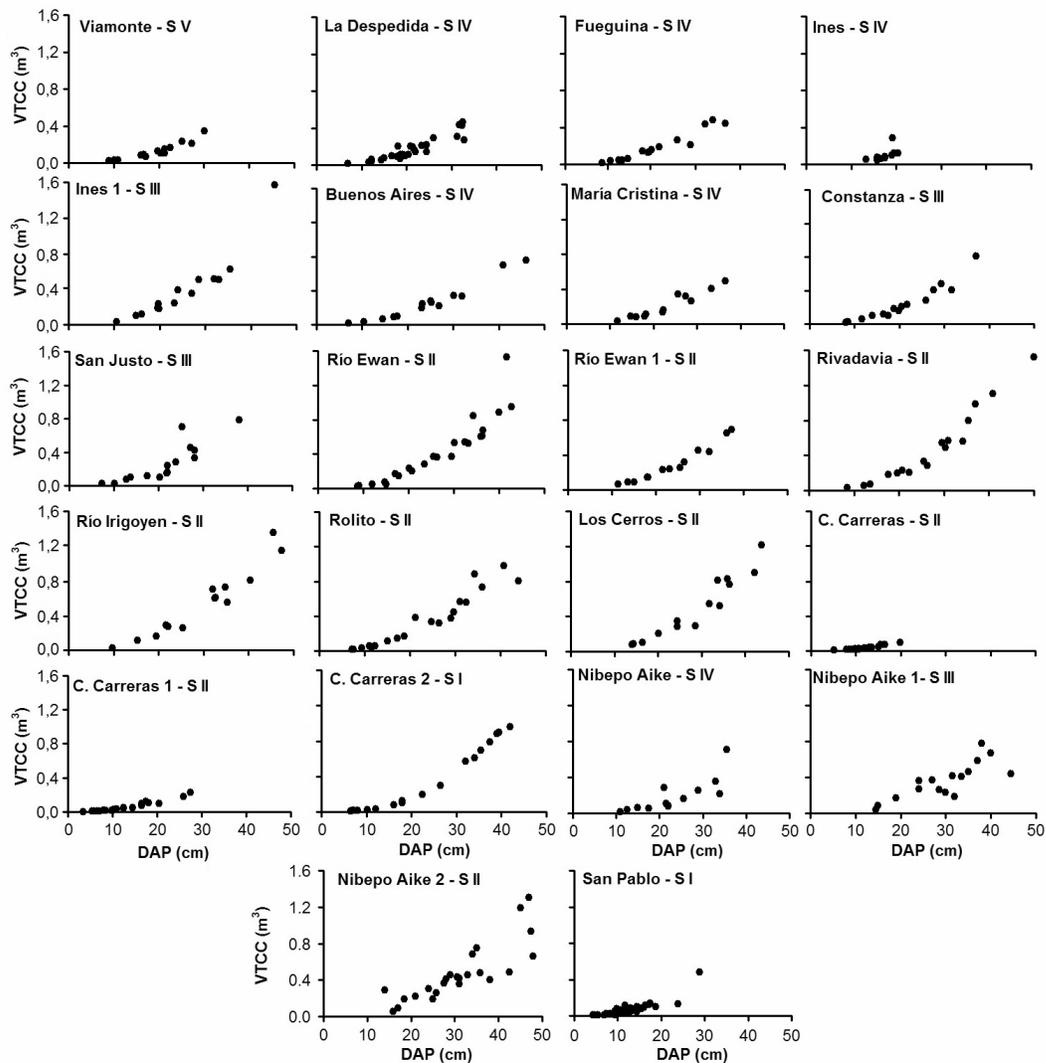


Figura 5.1. Dispersión de las unidades de muestreo de acuerdo al lugar de muestreo y su clase de sitio (S I a S V).

5.3.1.1. Ecuaciones locales

Al analizar el ajuste de las ecuaciones locales [1] (Tabla 5.5), se observó que los valores del parámetro “*b*”, se mantuvieron cercanos al valor esperable de magnitud dos. Los valores variaron entre 1,8 y 3,6, produciéndose los valores extremos, en sitios extremos o en rodales con una baja intensidad de muestreo. Por otro lado el parámetro “*a*” varió entre $1,002 \cdot 10^{-4}$ y $8,968 \cdot 10^{-5}$. En general las ecuaciones mostraron una buena flexibilidad a las bases de datos, las cuales explicaron entre el 75,4% y el 99,5% de la variación del VTCC (Tabla 5.4). Pudo observarse que el coeficiente de determinación de dicha ecuación utilizando la totalidad de los datos varió considerablemente (87%) respecto de los mejores modelos, pero siguió estando dentro de los límites promedios de la familia de ecuaciones locales.

El error estándar de la estimación (ESE) varió desde un máximo de 0,079 m³ que correspondió a la localidad de Nibepo Aike2 hasta valores menores a 0,001 m³. Por otro lado el error medio de la estimación presentó valores muy cercanos a cero en todos los casos, variando entre -0,008 m³ y 0,005 m³.

Tabla 5.4. Parámetros y estadísticos de los modelos locales desarrollados.

Lugar	IS ₅₀	S	N	Parm "a"	Parm "b"	R ² aj	ESE (m ³)	EME (m ³)
Viamonte	3,3	5	15	7,750 10 ⁻⁵	2,4478	94,8	<0,001	0,001
La Despedida	4,0	4	31	1,763 10 ⁻⁴	2,2145	86,1	0,002	<-0,001
Fueguina	4,6	4	15	3,044 10 ⁻⁴	2,0511	93,3	0,002	-0,002
Inés	4,6	4	9	5,694 10 ⁻⁵	2,5327	77,1	<0,001	<0,001
Inés1	7,1	3	16	1,303 10 ⁻⁴	2,4334	97,1	0,013	-0,005
Buenos Aires	4,6	4	15	2,333 10 ⁻⁴	2,1374	98,4	0,002	0,001
María Cristina	4,7	4	12	2,557 10 ⁻⁴	2,1074	92,8	0,002	-0,002
Constancia	5,3	3	15	1,304 10 ⁻⁴	2,3994	95,8	0,002	0,003
San justo	7,1	3	15	2,966 10 ⁻⁴	2,1768	75,4	0,014	-0,004
Río Ewan	7,3	2	14	8,733 10 ⁻⁴	1,8111	98,3	0,002	-0,006
Río Ewan1	9,2	2	23	8,968 10 ⁻⁵	2,5177	87,1	0,018	0,005
Rivadavia	7,9	2	17	2,705 10 ⁻⁴	2,2197	97,1	0,005	-0,005
Irigoyen	8,1	2	15	2,040 10 ⁻⁴	2,2770	97,3	0,010	0,005
Rolito	9,2	2	21	5,145 10 ⁻⁴	2,0195	94,1	0,009	-0,004
Los Cerros	10,7	1	16	2,557 10 ⁻⁴	2,2248	94,3	0,016	-0,005
C. Carreras	8,1	2	23	6,924 10 ⁻⁵	2,4466	95,1	<0,001	<0,001
C. Carreras1	9,2	2	25	2,214 10 ⁻⁴	2,0831	95,8	<0,001	-0,008
C. Carreras2	10,7	1	18	1,002 10 ⁻⁴	2,4702	99,5	<0,001	-0,003
Nibepo Aike	4,4	4	11	1,286 10 ⁻⁶	3,6079	82,6	0,002	<-0,001
Nibepo Aike1	6,2	3	13	5,016 10 ⁻⁴	1,9364	85,4	0,005	<0,001
Nibepo Aike2	9,0	2	28	4,846 10 ⁻⁴	2,0049	75,7	0,079	-0,006
San Pablo	10,9	1	48	1,136 10 ⁻⁴	2,4362	83,5	<0,001	0,003
Total			423	1,821 10 ⁻⁴	2,2840	87,0	0,020	-0,005

Donde IS₅₀: índice de sitio con una edad base de 50 años; S: clase de sitio; n: cantidad de individuos por localidad; ESE: error estándar de la estimación; EME = error medio de la estimación.

Al graficar la dispersión de los residuos se advirtieron comportamientos indeseables ya que los mismos no se distribuyeron homogéneamente ni en una misma magnitud a lo largo del rango de los volúmenes predichos (Figura 5.2). Esta falencia es muy común en la construcción de este tipo de modelos (Martínez Pastur et al., 1993; 1995; Fernández et al., 1995; Peri et al., 1997; Lencinas et al., 2002). No obstante, se observó una distribución similar en la mayoría de las sitios, en la que los mayores residuos se presentaron en los mayores volúmenes predichos y los menores residuos en los menores volúmenes, adquiriendo, la nube de puntos una forma cónica.

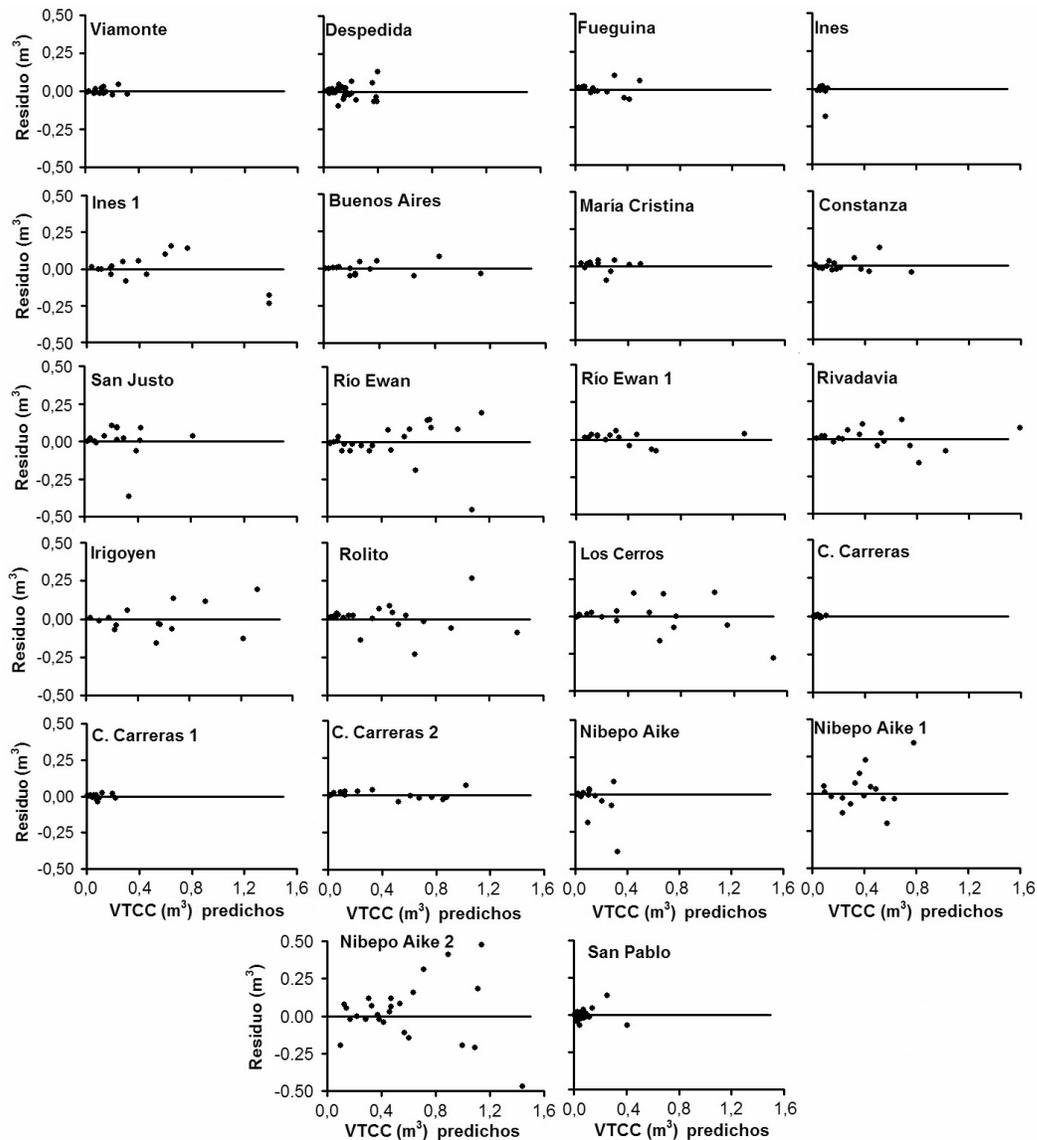


Figura 5.2. Distribución de residuos a lo largo del gradiente de volumen total con corteza (VTCC) predicho para cada lugar de muestreo.

Para poder comparar los errores obtenidos en los ajustes de los modelos, se compararon los mismos en función del volumen promedio medurado. En la Figura 5.3 se encuentran ordenados de acuerdo a la clase de sitio. Pudo notarse que los menores residuos fueron registrados en las menores clases de sitio, donde los individuos fueron de menor tamaño. Los errores rondaron entre un 14% y un 25% del volumen promedio que se pretendía estimar, estando dentro de parámetros aceptables para este tipo de modelos (Fucaraccio et al., 1999).

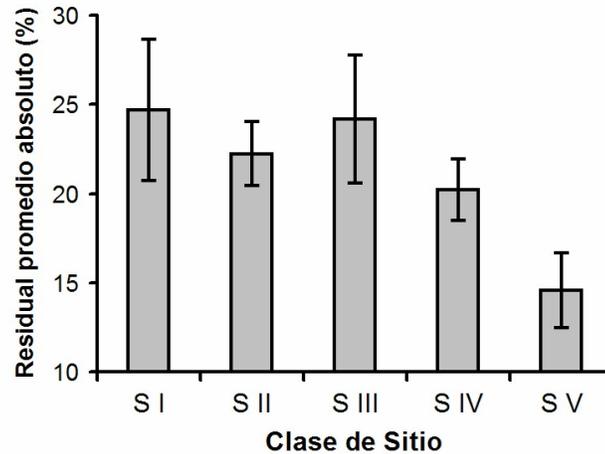


Figura 5.3. Residuales promedios porcentuales en valor absoluto a lo largo del rango de calidades de sitio muestreadas.

Al observar los estadísticos de las ecuaciones locales de parámetro “*b*” fijo a un valor de 2,298, no se encontraron modificaciones sustanciales en el ajuste, manteniendo los valores obtenidos anteriormente (Tabla 5.5). Los modelos explicaron entre el 75,2% y el 99,4% de la variación del VTCC. Mientras que el ESE y el EME variaron entre 0,0002 m³ y 0,08 m³ y entre -0,09 m³ y 0,03 m³ respectivamente. Al mantener constante el parámetro *b*, se pudo evaluar el comportamiento del parámetro *a*, a lo largo de un gradiente de índice de sitio (*IS*₅₀) (Figura 5.4). Al ajustar una línea de tendencia pudo observarse que el mismo tendió a aumentar con el índice de sitio, lo que justificaría el uso de ecuaciones locales integradas.

Tabla 5.5. Parámetros y estadísticos de los modelos locales desarrollados con el coeficiente “b” fijo a un valor de 2,298.

Lugar	IS ₅₀	S	N	Parm "a"	R ² aj	ESE (m ³)	EME(m ³)
Viamonte	3,3	5	15	1,245 10 ⁻⁴	94,9	0,0004	-0,0011
Despedida	4,0	4	31	1,327 10 ⁻⁴	86,5	0,0020	0,0013
Fueguina	4,6	4	15	1,293 10 ⁻⁴	93,1	0,0017	0,0055
Inés	4,6	4	9	1,119 10 ⁻⁴	79,2	0,0002	-0,0003
Inés1	7,1	3	16	2,176 10 ⁻⁴	97,1	0,0126	-0,0220
Buenos Aires	4,6	4	15	1,259 10 ⁻⁴	98,2	0,0018	0,0119
María Cristina	4,7	4	12	1,323 10 ⁻⁴	93,0	0,0016	0,0034
Constancia	5,3	3	15	1,831 10 ⁻⁴	96,0	0,0018	-0,0011
San justo	7,1	3	15	1,951 10 ⁻⁴	77,0	0,0127	0,0009
Ewan	7,3	2	14	1,349 10 ⁻⁴	92,9	0,0076	0,0427
Ewan1	9,2	2	23	1,964 10 ⁻⁴	87,5	0,0172	-0,0054
Rivadavia	7,9	2	17	2,012 10 ⁻⁴	97,2	0,0049	0,0017
Irigoyen	8,1	2	15	1,865 10 ⁻⁴	97,5	0,0093	0,0080
Rolito	9,2	2	21	1,821 10 ⁻⁴	93,5	0,0101	0,0166
Los Cerros	7,9	2	16	1,922 10 ⁻⁴	94,6	0,0155	0,0018
C. Carreras	8,1	2	23	1,031 10 ⁻⁴	94,9	0,0000	-0,0004
C. Carreras1	9,2	2	25	1,126 10 ⁻⁴	95,3	0,0002	0,0020
C. Carreras2	10,7	1	18	1,855 10 ⁻⁴	99,4	0,0008	-0,0089
Nibepo Aike	4,4	4	11	8,948 10 ⁻⁵	84,4	0,0017	-0,0003
Nibepo Aike1	6,2	3	13	1,395 10 ⁻⁴	85,0	0,0050	0,0106
Nibepo Aike2	9,0	2	28	1,522 10 ⁻⁴	75,2	0,0799	0,0306
San Pablo	10,9	1	48	1,718 10 ⁻⁴	83,5	0,0008	0,0001
Total			423	1,714 10 ⁻⁴	87,0	0,020223	-0,00394

IS₅₀ = índice de sitio con una edad base de 50 años; S = clase de sitio; R² aj.: Coeficiente de determinación ajustado; ESE: error estándar de la estimación; EME = error medio de la estimación.

5.3.1.2. Ecuaciones locales integradas

La regresión entre el parámetro “a” de los modelos locales y el IS₅₀ de acuerdo a la ecuación presentada en el apartado 5.2.1.2. [2] se observa en la figura 5.4. Los valores de los coeficientes fueron para $a' = 0,000772293$ y para $b' = 0,363731$, presentando un pobre ajuste. El R² aj. fue del 27,13%, el ESE de 0,000000001 y el EME de 0,00000004.

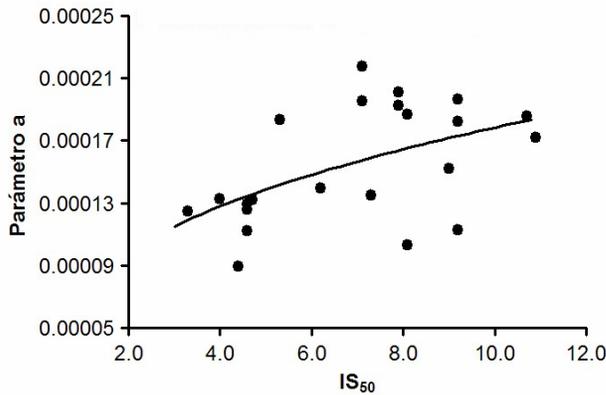


Figura 5.4. Variación del parámetro “a” en relación al índice de sitio.

El modelo local integrado [3] adoptó la forma que se presenta en la Figura 5.5, que se corresponde con el comportamiento observado para las otras funciones, siendo el mismo biológico y biométricamente adecuado para un modelo de volumen.

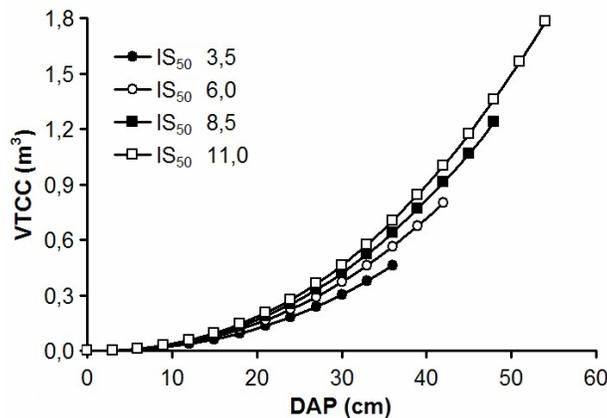


Figura 5.5. Sistema de ecuación integrada para *Nothofagus antarctica*, donde se grafican diferentes IS_{50} .

El análisis de los residuales de la unión de ambas funciones (modelo integrado) presentó valores que estuvieron en el rango de los residuales de las ecuaciones locales. El error estándar de la estimación (ESE) aumentó a media que aumentaba la clase de sitio (Tabla 5.6). Si bien, en todas las clases de sitio el EME fue cercano a cero, en las clases de sitio intermedias (S II, S III y S IV) se observó una tendencia a la sobreestimación (valores negativos) siendo la clase de sitio III la que mayor EME presentó. Por lado, las clases de sitio extremas (S I y S V) presentaron una leve tendencia a la subestimación del volumen. El error

medio absoluto (EMA) también presentó una tendencia a aumentar con la calidad de sitio, mientras que los errores porcentuales ($\% \bar{e}$ y $\% |\bar{e}|$) no mostraron tendencias claras.

Tabla 5.6. Errores promedio de la ecuación local integrada según la calidad de sitio.

S	n	ESE (m³)	EME (m³)	EMA (m³)	%\bar{e} (%)	%\bar{e} (%)
I	94	0,205	0,002	0,082	15,2	29,9
II	120	0,144	-0,020	0,085	-0,3	20,1
III	78	0,133	-0,042	0,065	7,0	30,2
IV	111	0,052	-0,001	0,031	8,9	22,0
V	20	0,038	0,006	0,021	8,5	20,4
TOTAL	423	0,139	-0,013	0,063	7,3	24,6

Donde: S: clase de sitio; n: cantidad de individuos; ESE: error estándar de la estimación; ESE: error estándar de la estimación; EME: error estándar de la media; $\% \bar{e}$: error medio porcentual y $\% |\bar{e}|$: error promedio porcentual en valor absoluto.

Por otro lado cuando se analizó el ajuste de la ecuación a lo largo de un gradiente de clases diamétricas, se observó que los mayores errores se registraron en las clases diamétricas mayores (Tabla 5.7) con excepción para los errores porcentuales ($\% \bar{e}$; $\% |\bar{e}|$) que mostraron sus mayores valores en la menor clase diamétrica (< 14,9 cm). Los mayores errores en las clases diamétricas superiores estuvieron relacionados con la menor cantidad de individuos muestreados en esas clases.

Tabla 5.7. Errores promedio de la ecuación local integrada según la calidad de sitio.

DAP (cm)	n	ESE (m³)	EME (m³)	EMA (m³)	%\bar{e} (%)	%\bar{e} (%)
< 14,9	135	0,023	<0,001	0,011	16,2	29,5
15,0 - 29,9	181	0,064	-0,013	0,042	2,6	22,5
30,0 - 44,9	86	0,167	-0,012	0,115	5,0	21,4
> 45,0	21	0,491	-0,092	0,372	1,0	24,9
TOTAL	423	0,139	-0,013	0,063	7,3	24,6

Donde: DAP: diámetro normal a 1,30 m; n: cantidad de individuos; ESE: error estándar de la estimación; ESE: error estándar de la estimación; EME: error estándar de la media; $\% \bar{e}$: error medio porcentual y $\% |\bar{e}|$: error promedio porcentual en valor absoluto.

5.3.1.3. Ecuación estándar tradicional y no tradicional

Al ajustar los parámetros del modelo estándar tradicional [4] se pudo percibir que el valor del parámetro “b” (2,08) (Tabla 5.9) fue muy similar al esperado (2,00), y que el parámetro “c” (0,66) fue cercano a la unidad. La forma que adoptó el modelo (Tabla 5.8) fue la correspondiente a una distribución exponencial de los datos de DAP que es lo esperado para los modelos de volumen en general, y un crecimiento lineal para los datos de HT (Figura 5.6).

Tabla 5.8. Parámetros y estadísticos del modelo estándar tradicional.

Parámetros	a	0,0000791214	
	b	2,07986	
	c	0,655819	
Estadísticos	n	423	
	R² aj	90,97	
	ESE	0,0140421	
	EME	0,000327354	

Donde: n: cantidad de individuos; R² aj: coeficiente de determinación ajustado, ESE = error estándar de la estimación; EME: error medio de la estimación; VTCC: volumen total con corteza; DAP: diámetro normal a 1,30 m; HT: altura total.

En la Figura 5.6 se observa una falta de homogeneidad de las varianzas a medida que la variable predicha (VTCC) aumenta de magnitud, además de concentrar la mayoría de los datos en la primera mitad de eje de las abscisas. Esta condición no es deseable, recomendándose numerosas alternativas para mitigar este defecto, principalmente transformaciones o ponderaciones (Williams & Gregoire, 1993). Sin embargo, dichas acciones no mejoraron el ajuste general del modelo al analizar los residuales y entorpecen la interpretación de algunos de los estadísticos al modificarse las magnitudes y unidades de los mismos (Martínez Pastur et al., 1993).

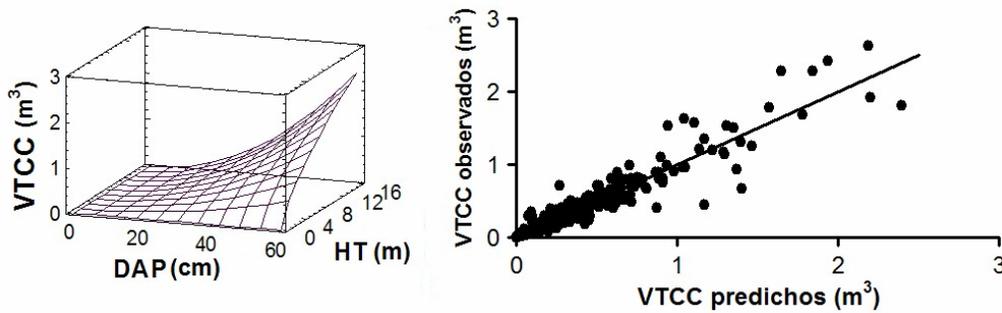


Figura 5.6. Superficie de respuesta del modelo estándar tradicional y dispersión de residuos.

Los parámetros ajustados del modelo estándar no tradicional [5] se presentan en la Tabla 5.9. Al igual que en el anterior modelo, el ajuste de estos parámetros fue altamente significativo. El coeficiente de determinación (87,9%) no varió mayormente respecto de la ecuación tradicional [4], poniendo en evidencia la potencialidad de la calidad de sitio para suplantar a la medición de la HT.

La forma de las curvas de VTCC adoptó una forma exponencial. La pendiente de las curvas fue menor a medida que disminuyó la clase de sitio. El menor volumen predicho a un determinado DAP en la clase de sitio inferior se debió a la altura de los árboles más baja.

Tabla 5.9. Parámetros y estadísticos del modelo estándar no tradicional.

Parámetros	a	0,0000606707	
	b	1,08673	
	c	2,50975	
Estadísticos	n	423	
	R² aj	87,85	
	ESE	0,0188988	
	EME	-0,00442961	

Donde: n: cantidad de individuos; R² aj: coeficiente de determinación ajustado, ESE: error estándar de la estimación; EME: error medio de la estimación; VTCC: volumen total con corteza; DAP: diámetro normal a 1,30 m; S: clase de sitio.

Por otra parte, al igual que la ecuación estándar tradicional, el presente modelo presentó una falta de homogeneidad de las varianzas a medida que la variable predicha (VTCC) aumentó de magnitud, concentrando la mayoría de los datos en la primera mitad del eje de las abscisas (Figura 5.7). Estas características no varían respecto del anterior

modelo, necesitándose ampliar la base de datos para las muestras de árboles mayores de los 40 cm de diámetro.

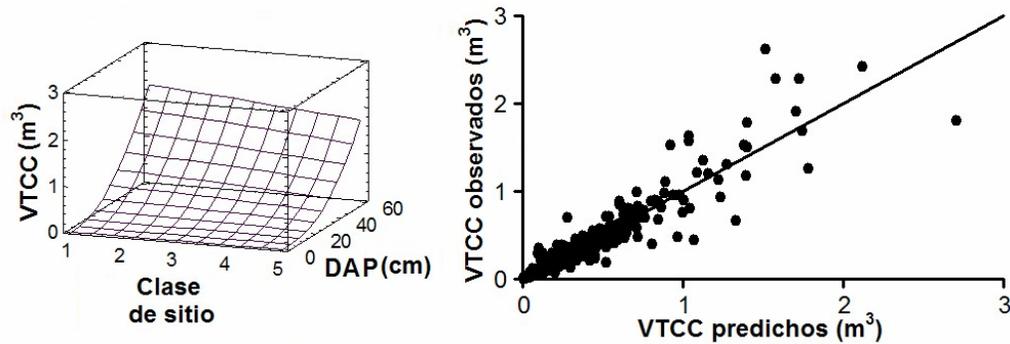


Figura 5.7. Superficie de respuesta del modelo estándar no tradicional y dispersión de residuos.

5.3.2. Modelos de rodal

El muestro para el ajuste de modelos de rodal abarcó todo el gradiente de calidades de sitio y de edades. El rango con menor frecuencia de muestreos (Tabla 5.10) se correspondió con los rodales jóvenes (COI y COF) de las menores calidades de sitio (S IV y S V). Mientras que los muestreos en las clases de sitio intermedias (S II y S III) fueron los más frecuentes.

Tabla 5.10. Cantidad de parcelas según clase de sitio y fase de crecimiento.

	S I	S II	S III	S IV	S V	Total
COI	5	12	10	2	0	29
COF	6	14	16	4	1	41
ENV	7	9	8	2	9	35
DESM	7	6	8	5	5	31
Total	25	41	42	13	15	136

Donde: S: clase de sitio; COI: Fase de crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: Envejecimiento; DESM: Desmoronamiento.

5.3.2.1. Ecuaciones de relación VTCC/AB ($m^3.m^{-2}$)

El modelo basado en la ecuación de volumen no tradicional [6] presentó estadísticos aceptables (Tabla 5.11), siendo los errores globales del modelo muy bajos en relación al resto de los modelos de rodal ajustados. Este modelo permitió obtener una relación entre el volumen total y el área basal del rodal ($m^3.m^{-2}$) a partir de la edad y el índice de sitio del

mismo. Esta relación VTCC / AB multiplicada por el área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$) nos brinda el volumen total por hectárea ($m^3 \cdot ha^{-1}$). El modelo mostró un aumento en la relación a lo largo de la edad del rodal. Pero esta relación no alcanzó a formar una asíntota en las edades avanzadas del desarrollo. También se observó una mayor diferenciación de la Relación ($m^3 \cdot m^{-2}$) entre los distintos índices de sitio en las edades más avanzadas respecto de las edades juveniles.

Tabla 5.11. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo no tradicional.

Parámetros	a	0,191661	
	b	0,742112	
	c	0,494248	
	d	-0,102752	
Estadísticos	n	136	
	R² aj	94,06	
	ESE	0,145964	
	EME	-0,012938	

Donde: n: tamaño de la muestra; R^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado; ESE: error estándar de la estimación; EME: Error medio de la estimación. El gráfico presenta curvas de la relación VTCC / AB por índices de sitio (IS_{50}) en m.

En este modelo, tanto la edad como el índice de sitio afectaron a la relación modelizada en forma no lineal (Figura 5.8). Ambas variables fueron importantes para definir esta modelización y deberían ser incorporadas dentro de este tipo de ecuaciones. Los residuos mostraron una leve tendencia a la sobreestimación en los extremos de la nube de puntos, mientras que en la zona media se observó una tendencia a la subestimación. No obstante la dispersión de los residuos no presentó una gran variación a lo largo de la variable dependiente.

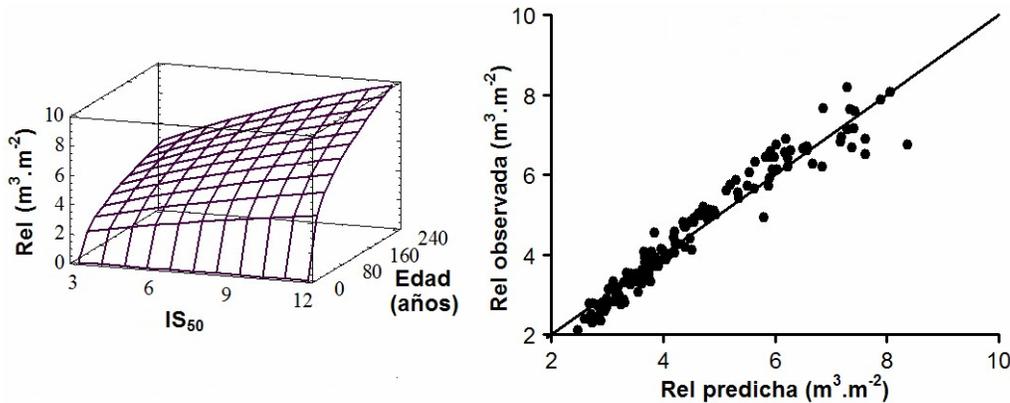


Figura 5.8. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo no tradicional y dispersión de residuos.

El modelo de Chapman-Richards [7] presentó un mejor ajuste respecto de la ecuación de relación VTCC / AB, tanto en el coeficiente de determinación como en los residuales (Tabla 5.12). El modelo mostró un aumento en la relación VTCC / AB con la edad del rodal hasta que alcanza una asíntota a los 120 años de edad, obteniendo a los 150 años, rodales de IS_{50} de 9,3 m, 7,2 m, 5,1 m y 3,6 m relaciones de $7,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, $6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, y $4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ respectivamente.

Tabla 5.12. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC/AB de rodal basado en el modelo de Chapman-Richards.

Parámetros	a	2,8757	
	b	0,436077	
	c	-0,016053	
	d	2,42455	
	e	-0,534934	
Estadísticos	n	136	
	R² aj	96,89	
	ESE	0,0769	
	EME	-0,0017	

Donde: n: tamaño de la muestra; R^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado; ESE: error estándar de la estimación; EME: Error medio de la estimación. El gráfico presenta curvas de la relación VTCC / AB por índices de sitio (IS_{50}) en m.

La forma del modelo es la característica para este tipo de funciones. Adopta una forma sigmoide a lo largo del rango de edades del rodal y una forma básicamente lineal a lo largo de un gradiente de calidades de sitio (Figura 5.9). La dispersión de los residuales

presentó un comportamiento similar a la ecuación de volumen no tradicional [6] sobreestimando levemente en los extremos de la nube de puntos y subestimando en los valores medios de la relación VTCC / AB.

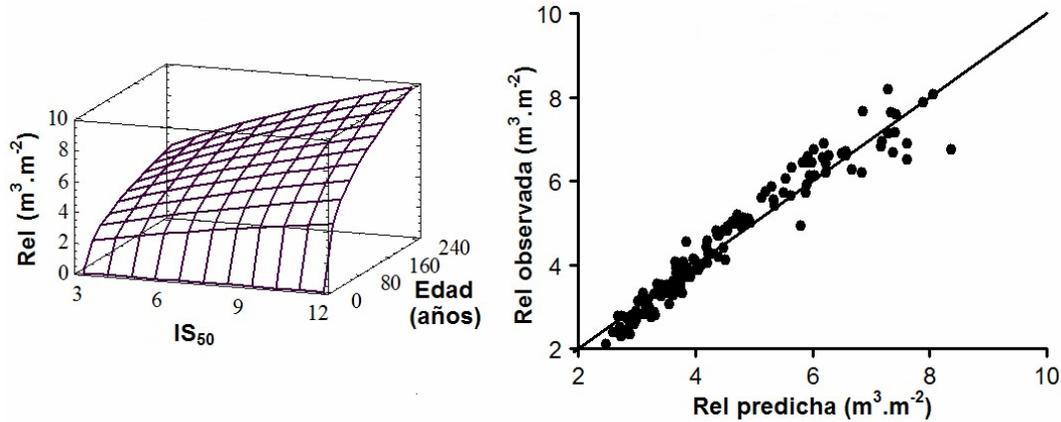


Figura 5.9. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Chapman-Richards y dispersión de residuos.

El modelo de Weibull [8] posee las mismas características biológicas que el modelo de Chapman-Richards alcanzando una asíntota a la edad aproximada de 120 años y presentando estadísticos similares a este último (Tabla 5.13).

Tabla 5.13. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Weibull.

Parámetros	a	3,3658	
	b	0,34576	
	c	-0,008561	
	d	0,684854	
	e	0,613206	
Estadísticos	n	136	
	R² aj	96,57	
	ESE	0,0844	
	EME	0,0075	

Donde: n: tamaño de la muestra; R²aj: coeficiente de determinación ajustado; ESE: error estándar de la estimación; EME: Error medio de la estimación. El gráfico presenta curvas de la relación VTCC / AB por índices de sitio (IS₅₀) en m.

La superficie de respuesta del modelo de Weibull [8], al igual que la del modelo de Chapman-Richards [7] muestra que la edad es la variable más determinante respecto de la

relación VTCC / AB. Observándose una mayor variación en la Relación VTCC/AB a lo largo del gradiente de edad que a lo largo del gradiente de índice de sitio (Figura 5.10). La dispersión de los residuales mostró la distribución más equilibrada de los modelos de relación previamente analizados. Sin presentarse tendencias a lo largo del gradiente de la variable a estimar, obteniéndose una nube de puntos de igual dispersión en el gradiente de dicha variable. Estos dos últimos modelos (Chapman-Richards y Weibull) utilizan las mismas variables (IS_{50} y edad) que el primer modelo presentado (estándar no tradicional), habiendo alcanzado un mejor ajuste sin aumentar la complejidad del muestreo.

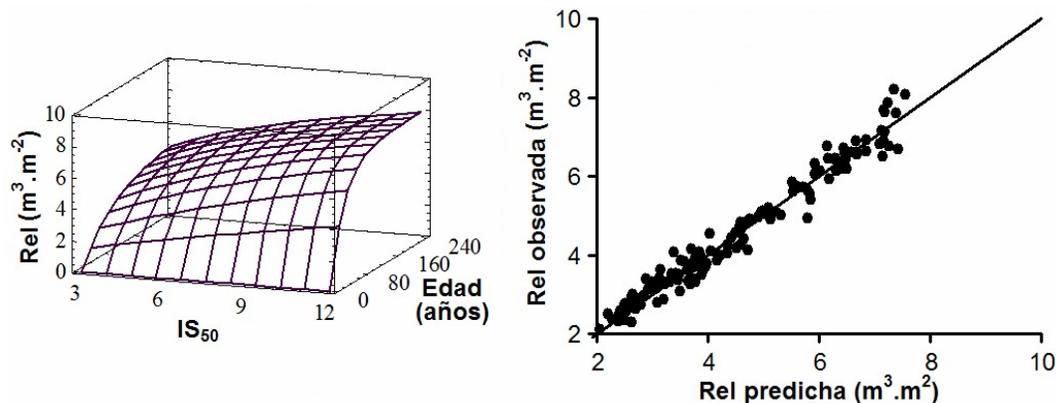


Figura 5.10. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Weibull y dispersión de residuos.

Los resultados de la autovalidación no mostraron tendencias entre clases de sitio (Tabla 5.14). Los errores promedios no superaron el 5,1% mientras que los errores absolutos variaron entre 8,7% y 4,4%. En general los menores errores se registraron para las ecuaciones de Chapman-Richards y de Weibull.

Tabla 5.14. Error promedio y error promedio absoluto, y porcentuales entre paréntesis de los modelos de relación VTCC/AB para el gradiente de clases de sitio.

Sitio	\bar{e} (m ³)			\bar{e} (m ³)		
	NT	CR	W	NT	CR	W
S I	-7,6	-1,3	-2,6	20,6	16,6	19,0
	(-1,7%)	(-0,2%)	(-1,2%)	(5,4%)	(4,6%)	(5,9%)
S II	1,1	1,7	1,2	16,4	12,1	12,4
	(1,1%)	(0,6%)	(0,0%)	(5,8%)	(4,5%)	(4,9%)
S III	3,5	1,0	2,6	16,0	10,8	10,5
	(5,1%)	(1,0%)	(1,6%)	(8,7%)	(5,1%)	(5,3%)
S IV	0,0	-5,0	-3,1	13,8	9,0	7,3
	(2,0%)	(-3,8%)	(-2,3%)	(8,3%)	(5,5%)	(4,4%)
S V	-2,5	1,6	-1,6	9,2	7,4	9,1
	(-0,9%)	(0,7%)	(-1,1%)	(5,1%)	(4,4%)	(5,2%)
Total	-0,27	0,27	0,20	15,99	11,71	12,19
	(1,7%)	(0,2%)	(-0,09%)	(6,8%)	(4,8%)	(5,2%)

Donde \bar{e} : error promedio; $|\bar{e}|$: error promedio en valor absoluto; NT: Ecuación de relación VTCC/AB basada en el modelo de volumen estándar no tradicional; CR: ecuación de relación basada en Chapman-Richard; W: ecuación de relación basada en Weibull.

La correspondencia que mostraron las curvas del modelo de Chapman-Richards también se puede ver en los valores de Rel VTCC / AB de la Tabla 5.15, que al ser multiplicados por el AB promedio correspondiente a cada edad del rodal permitió obtener el VTCC por hectárea. El VTCC también aumentó con la calidad de sitio así como también con la edad, alcanzando valores de 442 m³.ha⁻¹ en rodales de 190 años con IS₅₀ 9,3 y de 284 m³.ha⁻¹ en rodales con un IS₅₀ de 3,6.

Tabla 5.15. Valores individuales de la relación de volumen total y área basal y valores medios de volumen a nivel de rodal.

Edad (años)	Rel VTCC / AB ($m^3 \cdot m^{-2}$)			
	IS ₅₀ 9,3	IS ₅₀ 7,3	IS ₅₀ 5,2	IS ₅₀ 3,6
15	2,59	1,99	1,35	0,87
45	4,70	3,93	3,04	2,29
80	5,99	5,17	4,21	3,38
120	6,77	5,95	4,98	4,13
150	7,12	6,30	5,32	4,48
190	7,39	6,57	5,60	4,76

Edad (años)	VTCC ($m^3 \cdot ha^{-1}$)			
	IS ₅₀ 9,3	IS ₅₀ 7,3	IS ₅₀ 5,2	IS ₅₀ 3,6
15	73,2	56,3	38,3	24,7
45	203,9	170,4	131,7	99,4
80	322,3	278,3	226,7	182,2
120	381,5	335,2	280,3	232,8
150	399,8	353,6	299,0	251,4
190	441,6	392,7	334,7	284,2

Donde Rel VTCC / AB: relación volumen total con corteza / área basal; VTCC: volumen total con corteza; IS₅₀: índice de sitio con edad base de 50 años.

5.3.2.2. Ecuación de uso práctico

La base de datos utilizada para el ajuste de este modelo [9] quedó comprendida por 41 rodales (Tabla 5.16). Las combinaciones AB-clase de sitio menos representadas en el muestro se correspondieron con los rodales de clase de sitio elevada (S I, S II y S III) con baja AB (< 50) y los rodales de baja calidad de sitio (S IV y S V) con elevada AB (> 70).

Tabla 5.16. Distribución de la base de datos de la ecuación de uso práctico según los gradientes de AB y clase de sitio.

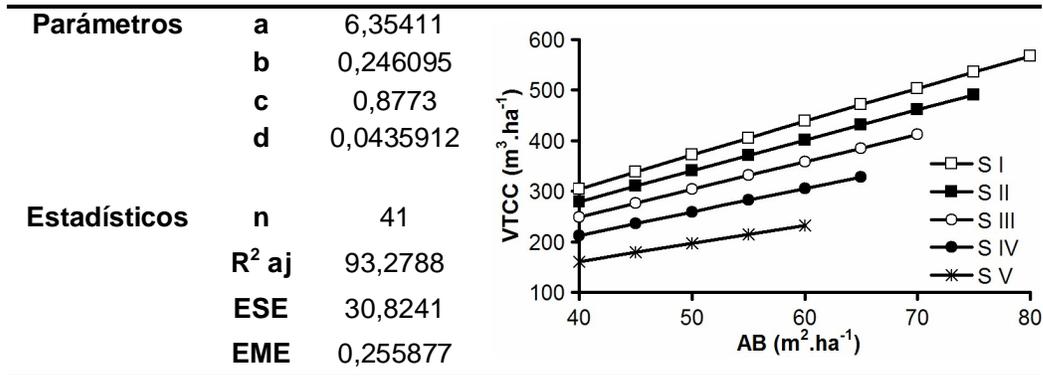
AB ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	S I	S II	S III	S IV	S V	Total
<50	1	0	0	1	4	6
50-59,9	3	2	1	1	2	9
60-69,9	4	1	4	2	2	13
>70	4	3	5	0	1	13
Total	12	6	10	4	9	41

Donde AB: área basal; S: clase de sitio.

El modelo de utilización práctica [9], a pesar de presentar un muestreo deficiente en algunas clases de sitio, también arrojó buenos estadísticos en su ajuste (Tabla 5.17). El

modelo mostró un comportamiento lineal del VTCC respecto del AB para cada clase de sitio. Asimismo, se observó una mayor diferenciación en el VTCC entre las menores calidades de sitio que entre las mayores calidades.

Tabla 5.17. Parámetros, estadísticos y curvas del modelo de volumen de uso práctico.



Donde: n: cantidad de individuos; R² aj: coeficiente de determinación ajustado, ESE = error estándar de la estimación; EME: error medio de la estimación; VTCC: volumen total con corteza; AB: área basal.

La superficie de respuesta del modelo muestra como las dos variables predictoras tienen similar importancia en la determinación del VTCC. La dispersión de los residuales no presentó tendencias, siendo la nube de puntos de similar dispersión a lo largo del gradiente de la variable a estimar (Figura 5.11).

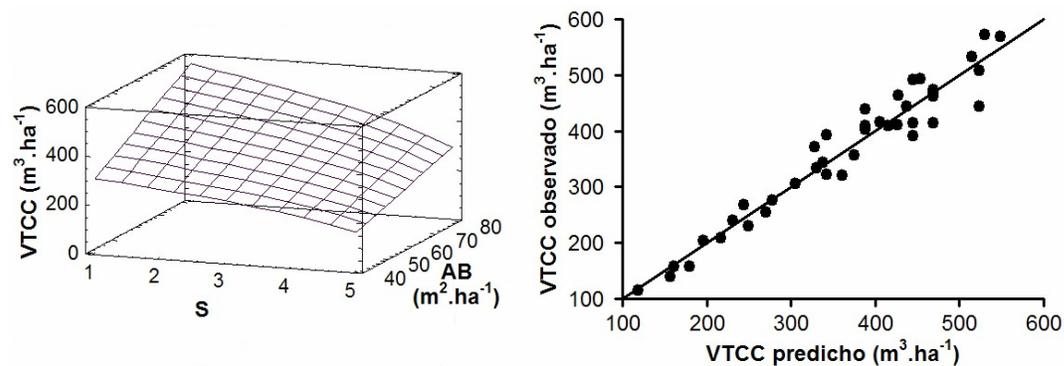


Figura 5.11. Superficie de respuesta del modelo de volumen de rodal de uso práctico y dispersión de residuos.

5.3.2.3. Ecuación de relación de Incremento volumétrico / área basal

La base de datos quedó comprendida por 680 pares de datos Inc VTCC / AB y Edad (Tabla 5.18). La distribución de la misma cubrió todas las clases de sitio, aunque no se muestrearon rodales en la clase de sitio S V que pertenezcan a la fase de desarrollo de crecimiento óptimo inicial.

Tabla 5.18. Distribución de la muestra utilizada para la construcción del modelo de relación de Inc VTCC / AB según la fase de desarrollo y la clase de sitio del rodal.

Fase	S I	S II	S III	S IV	S V	Total
COI	25	60	50	10	0	145
COF	60	55	80	20	5	220
ENV	40	35	45	10	45	175
DESM	40	15	35	25	25	140
Total	165	165	210	65	75	680

Donde COI: Fase de crecimiento óptimo inicial; COF: crecimiento óptimo final; ENV: envejecimiento; DESM: desmoronamiento; S: clase de sitio.

Al analizar gráficamente la relación Inc VTCC / AB en función de la edad del rodal (Figura 5.12), se observa como los datos se disponen de acuerdo a su clase de sitio. A pesar de que se observan solapamientos entre los datos, los rodales de mayor calidad de sitio (S I y S II) se ubicaron por encima de los rodales de calidad intermedia (S V) y estos últimos se ubicaron por encima de los rodales de menor calidad de sitio (S IV y S V).

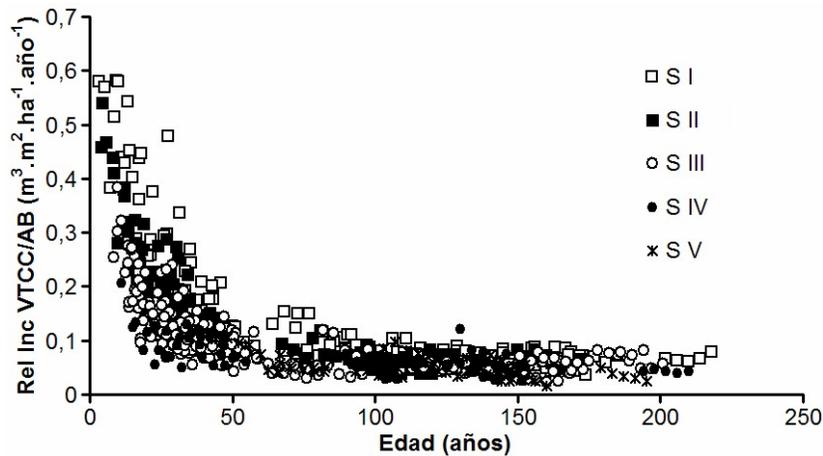


Figura 5.12. Dispersión de datos de relación de incremento volumétrico y área basal para un gradiente de calidades de sitio.

El modelo ajustado [10] permitió estimar satisfactoriamente la relación Inc VTCC / AB en función de la clase de sitio y la edad del rodal (Tabla 5.19). Los estadísticos obtenidos fueron satisfactorios teniendo en cuenta que el modelo cubre todo el gradiente de calidades de sitio y de edades. El comportamiento biológico del modelo ajustado fue adecuado, ya que reprodujo la dispersión de los datos observada en la Figura 5.12, manteniendo la separación entre las distintas curvas de calidad de sitio sin observarse entrecruzamientos de las mismas. También se observó que la proporción entre las curvas es diferente de acuerdo a la calidad de sitio, aumentando la diferencia al disminuir la misma.

Tabla 5.19. Parámetros, estadísticos y curvas del modelo de relación de Inc VTCC / AB.

Parámetros	a	0,30725	
	b	1,09594	
	c	-0,51310	
	d	0,149291	
Estadísticos	n	680	
	R² aj	80,07	
	ESE	0,04088	
	EME	0,00043	

Donde n: tamaño de la muestra; R²aj: coeficiente de determinación ajustado; ESE: error estándar de la estimación; EME: error medio de la estimación. Cada línea del gráfico representa una calidad de sitio diferente.

La superficie de respuesta muestra como la variable clase de sitio (S) influye más fuertemente en la relación Inc VTCC / AB a edades tempranas del desarrollo de los rodales que a edades tardías (Figura 5.13). Por otro lado, también se observó que en las mayores calidades de sitio (S I y S II), la variable edad afectó en un mayor grado la relación Inc VTCC / AB que en las menores calidades de sitio (S IV y S V). Tanto la variable independiente S, como la variable independiente edad afectaron de manera no lineal a la variable predicha.

Al analizar la dispersión de los residuos, se observó que la misma no es homogénea, aumentando la varianza a medida que aumentó el valor de la variable predicha. Asimismo, también se observó una leve tendencia a la sobreestimación en los valores bajos de la variable dependiente ($< 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) mientras que a partir de los $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, dicha situación se revirtió tendiendo a la subestimación.

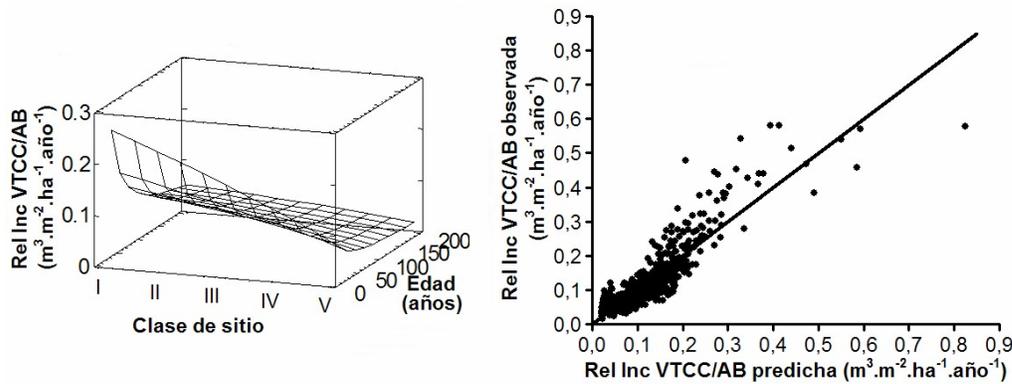


Figura 5.13. Superficie de respuesta y Dispersión de residuos del modelo de relación de Inc VTCC / AB.

Al analizar los errores expresados en $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, se observó que el modelo tendió a la subestimación (barras positivas) en las clases de sitio extremas (S I, S IV y S V), mientras que en las clases de sitio intermedias (S II y S III) tendió a la sobreestimación (barras negativas) (Figura 5.14). No obstante, cabe destacar que el máximo error promedio se registró en la menor calidad de sitio ($0,024 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$). El error absoluto (en $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) tendió a disminuir a medida que disminuyó la calidad de sitio variando entre $0,018$ y $0,035 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. Al analizar estos mismos errores pero en un gradiente de edades, se observó que entre los 30 y los 100 años, el modelo sobreestimó levemente, mientras que en el extremo del rango de edad (< 30 años y > 100 años) tendió a la subestimación. Por otro lado, el error absoluto disminuyó gradualmente a medida que aumentó la edad.

Al analizar los errores en valores porcentuales, las distribuciones de los errores se modificaron respecto de los errores expresados en $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. El error promedio sobreestimó levemente en todas las clases de sitio excepto en la clase S V donde subestimó fuertemente alcanzado un 40% de error. Por otro lado, el error absoluto invirtió su relación respecto del error absoluto expresado en $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ tendiendo a aumentar a medida que disminuyó la calidad de sitio.

Al evaluar los errores porcentuales a lo largo del gradiente de edades se observó una tendencia a la sobreestimación en los rodales de menos de 100 años de edad alcanzando un error promedio máximo de -18% (30 - 60 años de edad) mientras que a edades mayores a los 100 años el modelo tendió a la subestimación alcanzando un error de 9% (> 200 años de edad). El error absoluto porcentual presentó sus mayores valores a edades intermedias, mientras que en los extremos del gradiente de edad se registraron los menores valores de este error.

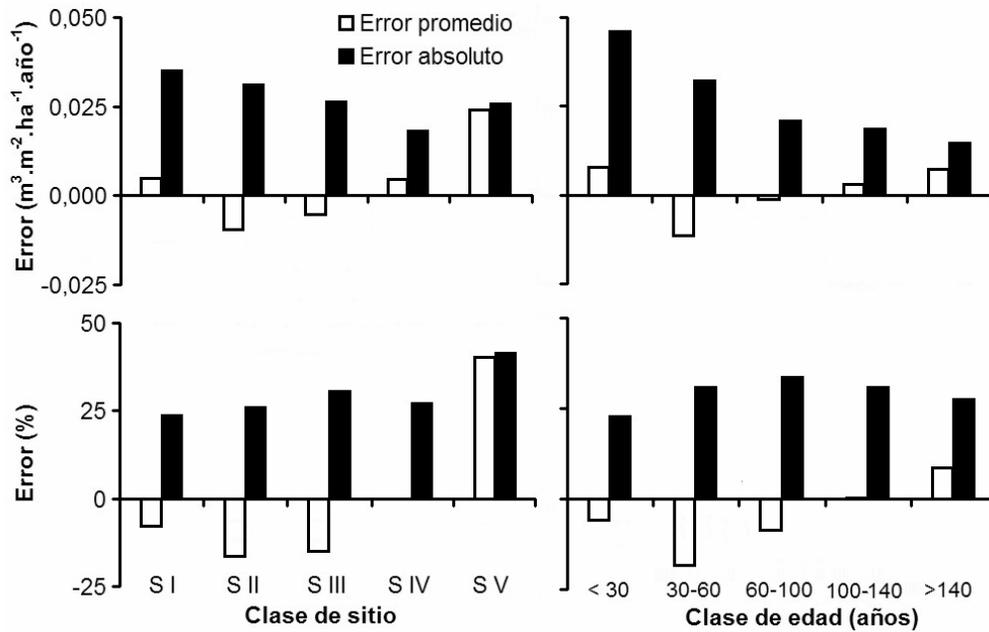


Figura 5.14. Errores promedios y absolutos a lo largo de gradientes de clases de sitio y de edades para el modelo de Relación Inc VTCC / AB.

Los valores de relación variaron entre los 15 y 40 años de edad del rodal entre 0,16 - 0,31 $m^3.m^{-2}.ha^{-1}.año^{-1}$ (S I) y 0,05 - 0,8 $m^3.m^{-2}.ha^{-1}.año^{-1}$ (S V). En edades mas avanzadas, la relación decrece, prediciendo el modelo valores para los 80 y 200 años de edad entre 0,1 y 0,06 $m^3.m^{-2}.ha^{-1}.año^{-1}$ (S I) y entre 0,03 y 0,02 $m^3.m^{-2}.ha^{-1}.año^{-1}$ (S V) (Tabla 5.20).

Para utilizar el presente modelo, los valores de relación obtenidos deben ser multiplicados por el área basal del rodal, obteniendo el incremento volumétrico por hectárea por año. Los incrementos volumétricos obtenidos variaron desde un máximo de 8,3 $m^3.ha^{-1}.año^{-1}$ para un rodal de la mejor calidad de sitio y 15 años de edad hasta un mínimo 1,3 $m^3.ha^{-1}.año^{-1}$ para un rodal de la peor calidad de sitio y 200 años de edad (Tabla 5.20). Dicho incremento volumétrico disminuyó gradualmente con la edad y con la calidad de sitio.

Tabla 5.20. Valores individuales de la relación Inc VTCC / AB, y valores medios de incremento volumétrico a nivel de rodal.

Edad (años)	Rel Inc VTCC / AB ($m^3.m^2.ha^{-1}.año^{-1}$)				
	S I	S II	S III	S IV	S V
15	0,307	0,256	0,200	0,141	0,076
40	0,164	0,140	0,113	0,083	0,048
80	0,105	0,091	0,076	0,057	0,034
120	0,081	0,071	0,060	0,046	0,028
160	0,067	0,060	0,051	0,039	0,025
200	0,058	0,052	0,044	0,035	0,022

Edad (años)	Inc VTCC ($m^3.ha^{-1}.año^{-1}$)				
	S I	S II	S III	S IV	S V
15	8,3	6,9	5,4	3,8	2,1
40	7,0	6,0	4,8	3,6	2,0
80	5,8	5,0	4,2	3,2	1,9
120	4,6	4,0	3,4	2,6	1,6
160	4,1	3,7	3,1	2,4	1,5
200	3,4	3,0	2,6	2,0	1,3

Donde Rel Inc VTCC / AB: relación entre el incremento en volumen total con corteza y el área basal; Inc VTCC: incremento anual en volumen total con corteza; S: clase de sitio.

5.4. Discusión

Los modelos evaluados en el presente capítulo variaron desde distintos puntos de vista. Los mismos tuvieron distinto alcance (modelos de árbol individual y de rodal), así como también diferentes variables predictoras, lo que determinó diferentes requerimientos en los inventarios que se realicen con el fin de predecir el volumen. La calidad y la cantidad de las variables a obtener en un inventario determinan no solo los costos económicos de los mismos, sino también el tiempo requerido para realizarlos, por lo que la incorporación de variables a un modelo debe basarse en un balance justificado que considere las ventajas y desventajas que implica. Por ejemplo, la medición del diámetro de todos los individuos de una parcela, debido a la sencillez de obtener esta variable, resulta más económico y rápido que medir la altura total de los mismos.

Los modelos locales [1] se realizan para un rodal en particular y su utilización se restringe a ese lugar (Prodan et al., 1997). Se los realiza con un fin determinado y su uso fuera del sitio de construcción resulta muy riesgoso en términos de error y precisión. Sin embargo, es factible su utilización en rodales que tengan la misma calidad de sitio y la

misma edad de desarrollo. Los modelos locales obtenidos en este trabajo presentaron una gran variabilidad en su calidad de ajuste, la cual puede deberse a una escasa cantidad de datos obtenida en algunos sitios muestreados.

Los modelos estándares ajustados (tradicional [4] y no tradicional [5]) presentaron ajustes levemente inferiores a los mejores modelos locales. Y si bien, la elaboración de estos modelos es más costosa e insumen más tiempo que la de los modelos locales, ya que se requieren otras variables además del DAP, su utilización es más generalizada y coherente para determinados tipos de estudios, por ejemplo, en inventarios provinciales o regionales, donde sería imposible construir un modelo local en cada punto de muestreo. El modelo estándar no tradicional si bien tuvo un ajuste levemente inferior al del modelo estándar tradicional, presentó la ventaja de no requerir la medición de la altura de cada árbol, lo cual abarata los costos de los inventarios forestales. Sin embargo requiere la determinación a nivel rodal de la variable clase de sitio. Esta variable suele ser muy precisa por cuanto las calidades de sitio son rangos de altura y no valores específicos (e.g. HT). Esta toma de datos para alimentar el modelo es más precisa, barata y ágil.

Los modelos estándares, que a diferencia de los modelos locales se realizan para ser utilizados a escala de paisaje, deberían ser utilizados solo en los rangos de toma de la muestra con las que han sido construidos (Loetsch et al., 1973; Husch et al., 1982). Teniendo en cuenta que la amplitud de las bases de datos con las que fueron construidos estos modelos para bosques de *N. antarctica* cubre en gran medida los gradientes de edades y de calidades de sitio presentes en Patagonia Sur, se puede afirmar que los modelos aquí propuestos gozan de una amplia aplicabilidad a escala regional.

Los modelos de rodal que predicen la relación VTCC/AB (ecuaciones [6], [7] y [8]) presentaron ajustes similares entre sí, siendo el modelo de Chapman-Richards [7] el que presentó los menores errores. Por otro lado, el modelo de uso práctico [9], si bien presentó errores levemente mayores tuvo la ventaja de ser el modelo de más fácil aplicación, ya que solo requiere que se tomen datos de área basal y la clase de sitio. Ambas variables son comúnmente medidas en los inventarios forestales. Mientras que para la utilización de los modelos de relación VTCC / AB se requiere la medición del índice de sitio (IS_{50}) y la edad, ambas variables implican un mayor costo de muestreo.

Los bosques de *N. antarctica* demostraron tener menores relaciones VTCC / AB que los bosques de *N. pumilio*. De acuerdo al modelo de Chapman-Richards un bosque de ñire en fase de envejecimiento presenta relaciones entre $7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ y $4,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ para calidades de sitio S I y S V respectivamente. Mientras que los bosques de lenga en fase de envejecimiento para la mejor y la peor calidad de sitio presentan valores de relación VTCC / AB de $15,3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ y $4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ respectivamente (Martínez Pastur, 2006). Esta mayor relación registrada en los bosques de lenga de buenas calidades de sitio respecto de los de

ñire se debe en gran medida en las mayores alturas que alcanzan los árboles de lenga (Martínez Pastur et al., 1997; Ivancich et al., 2011).

Dentro de los modelos de rodal ajustados, el modelo de uso práctico es el que más limitaciones de uso presenta, ya que solo es utilizable en rodales con edades superiores a los 120 años. Aunque cabe destacar que este tipo de bosques son los de mayor interés entre los técnicos que utilizan este tipo de modelos. Otra ventaja que presenta este modelo es que trabaja con calidades de sitio (S I a S V) y AB, las cuales son variables de muy fácil medición, evitando la determinación de la edad del rodal o los DAP de cada árbol de la parcela. Fue debido a estas características que se lo ha llamado modelo de “uso práctico”.

Por su parte, el modelo de relación de Inc VTCC / AB [10] también permitió la determinación de incrementos volumétricos a partir de variables de fácil medición o estimación, fundamentalmente gracias a la utilización de parcelas de diámetro variable (Bitterlich, 1984), que evitan la medición de todos los individuos de una parcela de inventario. Los valores de relación Inc VTCC / AB fueron similares a los registrados para bosques de lenga. En los bosques de ñire los máximos valores de Rel Inc VTCC / AB para la mejor y la peor clase de sitio fueron de $0,63 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y $0,13 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ respectivamente, mientras que en bosques de lenga los valores de Rel Inc VTCC / AB variaron entre $0,80 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Al analizar estos resultados en valores de incremento volumétrico, los bosques de ñire mostraron menores incrementos que los bosques de lenga, alcanzando valores máximos entre $8,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y $2,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ mientras que los bosques de lenga presentan valores entre $20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y $5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Martínez Pastur et al., 2008b). Este menor incremento volumétrico en los bosques de ñire respecto de los de lenga se debe a un doble efecto, ya que los bosques de ñire presentan menores alturas pero también menores áreas basales ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$).

La estimación del volumen de madera es importante para poder determinar el tipo de manejo forestal a realizar. No obstante, los modelos ajustados en el presente capítulo, además de servir para el cálculo del volumen, podrían ser utilizados, con los correspondientes ajustes, para la determinación de la biomasa forestal. Esta variable es de importancia para poder estimar el grado de captura de carbono realizado por los ecosistemas forestales (Muukkonen, 2007). Por ello, tanto desde el punto de vista de los bienes maderables como de los servicios ambientales, es importante contar con ecuaciones confiables de predicción que permitan estimar el volumen (Reque et al., 2007).

5.5. Conclusiones particulares

Si bien es necesaria la realización de validaciones independientes de los modelos para conocer el verdadero margen de error de las estimaciones, los modelos propuestos,

individuales o de rodal, pueden resultar herramientas confiables de predicción y de uso práctico para el manejo forestal. Esto, siempre y cuando se tengan en cuenta las limitaciones de uso de los modelos y la calidad de los datos obtenidos en los inventarios.

Para los cálculos volumen es posible sustituir variables de difícil medición por otras de fácil estimación, tanto a nivel individual como de rodal sin comprometer el ajuste o la biología de los modelos.

La aplicación de los diversos modelos de volumen propuestos para los bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur permitirá diagramar tomas de datos más eficientes durante los inventarios forestales.

CAPÍTULO VI

Modelo de producción para rodales de *Nothofagus antarctica* bajo dinámica natural

6.1. Introducción

La capacidad de predecir el desarrollo de un rodal desde las etapas juveniles hasta la madurez y atendiendo a distintos aspectos estructurales del mismo, resulta de primordial importancia en la planificación del manejo forestal. Para poder simular el crecimiento de un rodal es necesario integrar diferentes aspectos de la dinámica de los rodales, los cuales incluyen factores como el crecimiento de los árboles (diámetro y altura), la mortalidad y la dinámica de copas.

En los capítulos precedentes se ajustaron diversos tipos de modelos que predicen la variación de las principales variables (e.g., altura, diámetro, volumen) a lo largo de gradientes de edad, calidad de sitio y clase social. Pero estos modelos cobran mayor relevancia cuando se los aplica de forma integrada para modelar el desarrollo de un rodal en su conjunto. Asimismo, un comportamiento armonioso del modelado es indicador de un correcto desarrollo de los modelos que describen aspectos individuales de los bosques (e.g., variación de la densidad, crecimiento diamétrico o en altura). Así como también, indica una correcta compatibilidad de los modelos individuales previamente ajustados.

Objetivos particulares

Modelar el desarrollo de rodales de distinta calidad de sitio desde las fases iniciales de desarrollo hasta su madurez, empleando los modelos desarrollados en los capítulos precedentes de esta tesis.

6.2. Materiales y Métodos

Para el modelado del desarrollo de rodales de diferente calidad de sitio, fue necesario el ajuste de un modelo de índice de densidad de rodal y un modelo de descuento de la altura dominante para determinar la altura de aquellos árboles que pertenecen a la clase social codominante, intermedia y suprimida.

6.2.1. Índice de densidad de rodal

De acuerdo a Reineke (1933) la relación entre el diámetro cuadrático medio (DCM) y la densidad (N) se representa a partir de una ecuación lineal en una escala doble logarítmica:

$$\text{Log } N = a - b * (\text{Log DCM})^c$$

Donde a y b son los parámetros de la ecuación. Este modelo, al estar basado en la ley de autorraleo (Yoda et al., 1963), es considerado independiente de la edad y de la calidad de sitio. Preponiéndose originalmente una pendiente de 1,605 y una ordenada al origen variable según la especie (Reinke, 1933). No obstante, estudios posteriores demostraron que la pendiente de la recta también puede presentar variaciones entre especies (Zeide, 1987). Para un amplio rango de especies la pendiente puede variar entre -1.2 y -2.8 (Bravo et al., 1997). Sin embargo, el valor de reineke (1,605) es más bien extraordinario, siendo mas frecuentes los valores mayores a 1,8 y muy poco frecuentes los valores menores a 1,5 (Gadow et al., 2007).

La metodología de Reineke (1933) parece adecuada para un rango de distribución de las parcelas, pero no para sus extremos. Tal como se observa al comparar los pares de datos N/DCM, obtenidos para esta tesis y que se describirán más adelante, con el modelo de Reineke ajustado por Ivancich et al.,(2009) (Figura 6.1). Si se aplica la recta de Reineke, los extremos de las distribuciones aparecen sobreestimados. Debido a que los rodales jóvenes aumentan su área basal máxima con la edad y a que los rodales en fase de desmoronamiento, debido a la dinámica de gaps, disminuyen progresivamente su área basal.

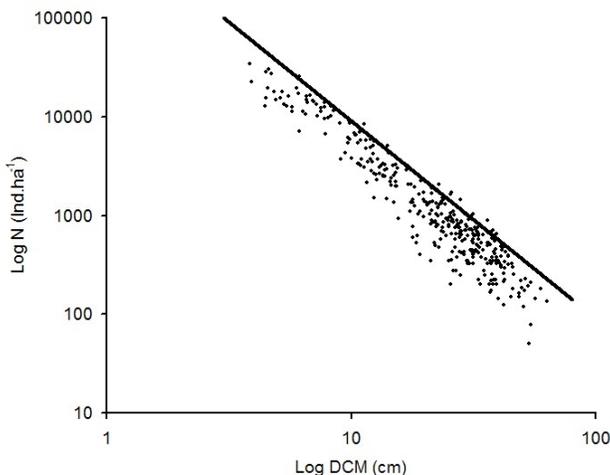


Figura 6.1. Pares de datos diámetro/densidad y modelo de densidad de rodal según Ivancich et al., 2009.

Debido a las falencias que muestra el modelo de Reineke en los extremos de distribución de los datos, se optó por seguir la metodología planteada por Zeide (1987) que propone ajustar un modelo no lineal de mayor complejidad dentro de una escala log-log. En este sentido, el modelo de índice de densidad de rodal está compuesto por tres ecuaciones que se aplican en distintos rangos diamétricos:

$$\text{DCM} < 10 \text{ cm} \quad \text{Log } N = a - b * (\text{Log DCM})^c$$

$$\text{DCM } 10 \text{ cm a } 39,9 \text{ cm} \quad N = a * \text{DCM}^{-b}$$

$$\text{DCM} > 40 \text{ cm} \quad N = e^{(a - b * \text{DCM})}$$

Donde: DCM: diámetro cuadrático medio (cm); N: densidad (ind.ha⁻¹); Log: logaritmo en base 10; e: constante de Euler; a, b y c: parámetros de las ecuaciones.

Utilizando como base, la ecuación lineal del nuevo modelo de densidad de rodal se determinó el índice de densidad de rodal para un diámetro de referencia de 25 cm (IDR₂₅) que se calcula bajo la siguiente relación (von Gadow et al., 2001):

$$\text{IDR}_{25} = N (25/\text{DCM})^{-b}$$

La base de datos para el ajuste del presente modelo, consistió en 506 pares de datos N – DCM obtenidos a partir de parcelas de inventario establecidas en bosques de *N. antarctica* de las provincias de Tierra del Fuego y Santa Cruz. Entre estos pares de datos se incluyen los 136 obtenidos en el muestreo descrito en la sección 3.2.1. El ajuste de los modelos se realizó por medio de iteraciones múltiples hasta que la línea de máxima densidad del modelo coincidiera con las parcelas de máxima densidad dentro de cada frecuencia diamétrica, pero dejando un 5% de las parcelas por encima de dicha línea. Estas parcelas fueron consideradas rodales sobre-poblados.

6.2.2. Modelo de descuento de la altura dominante

Debido a que la ecuación que describe el crecimiento en altura para las diferentes calidades de sitio, solo es aplicable para individuos pertenecientes a la clase social dominante, se ajustó una ecuación que realiza un descuento a la altura dominante de acuerdo a la clase social del árbol considerado en función de un gradiente de calidades de sitio. El modelo adopta la siguiente forma.

$$\%HD = ClaseSocial^{a((6-S)^b)}$$

Donde %HD: porcentaje de la altura dominante; S: clase de sitio (de I a V incorporándose en la ecuación como números arábigos); a y b son parámetros del modelo.

Este modelo fue ajustado a partir de técnicas de regresión no lineal mediante el algoritmo de Marquardt, utilizando el software Statgraphics 5.1 (Statgraphics, 2001). La base de datos estuvo compuesta de 812 individuos provenientes de las parcelas de inventario ya descritas anteriormente (Apartado 3.2.). De cada individuo se midió la altura total y la clase social.

6.2.3. Esquema de trabajo y simulaciones

El esquema de trabajo consistió en simular el desarrollo de un rodal, tomando como punto de partida una fase de crecimiento óptimo inicial hacia un rodal futuro en fase de desmoronamiento siguiendo una dinámica natural de autorraleo. Es decir, manteniendo una densidad máxima de ocupación (100% del índice de densidad de rodal - IDR_{max}). Dicha simulación se realizó considerando tres calidades de sitio para su comparación (S I, S III y S V). Se utilizó un porcentaje de área basal fijo a lo largo del tiempo para cada una de las clases sociales. Esto se debió a que en un análisis comparativo previo no se observaron variaciones significativas de cambio de porcentajes de área basal entre las diferentes clases sociales a lo largo del desarrollo de los rodales (Apartado 3.3 - Tabla 3.3).

Para simular el desarrollo natural de los rodales se emplearon diferentes tipos de modelos. El esquema de trabajo se presenta en la Figura 6.2 donde se visualizan los procesos dinámicos simulados y las variables que influyen en los mismos. Se utilizó el modelo integral de crecimiento diamétrico (Apartado 4.3.2.) para simular el crecimiento diamétrico de cada individuo de la parcela a partir de las variables clase de sitio, edad y clase social. La densidad se modeló a partir de un modelo de densidad de rodal (Apartado 6.2.1.). El volumen de cada árbol fue calculado a partir de una ecuación estándar tradicional (Apartado 5.3.1.3.) que predice el volumen total con corteza a partir de las variables altura total y diámetro. El crecimiento en altura fue calculado a partir de la ecuación de índice de sitio de Newnham (Apartado 2.2.3.), que predice la altura dominante a partir de IS_{50} y la edad, y de acuerdo al modelo de descuento de la altura dominante para determinar la altura de los individuos de las clases sociales inferiores (codominantes, intermedios y suprimidos) (Apartado 6.2.2).

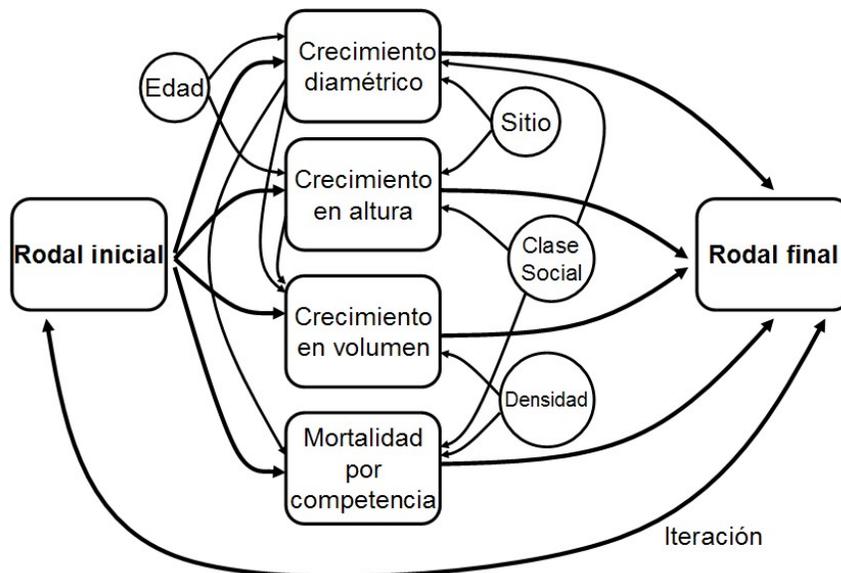


Figura 6.2. Esquema de trabajo del modelo de producción.

Para el inicio de las simulaciones se partió de una misma estructura forestal inicial, de modo de poder comparar la evolución de la masa a lo largo de la edad del rodal creciendo en diferentes calidades de sitio. El rodal inicial se generó a partir las distribuciones diamétricas observadas en parcelas de ñire pertenecientes a calidades de sitio intermedias. En base a estas características estructurales se diseñó una parcela que representó el rodal inicial, la cual presentó las distribuciones diamétricas y proporción de clases sociales observadas en los muestreos, pero con un IDR del 100%. El tamaño de parcela elegido fue de 500 m², lo que permitió iniciar las simulaciones con un elevado número de árboles (1589 árboles) y arribar a las etapas finales del desarrollo del rodal con una cantidad suficiente de individuos que expresen la variabilidad interna de la parcela. No fue posible iniciar las modelizaciones con una estructura inicial que presentara un diámetro cuadrático medio (DCM) de cero o cercano a cero debido a que no se contó con mediciones de parcelas tan jóvenes. Por ese motivo se partió con un rodal inicial con 15 años de edad al DAP y con un DCM de 3,3 cm.

El proceso de simulación del desarrollo del rodal consistió en realizar las modelaciones a lo largo de todo el período de desarrollo del rodal de manera periódica. Hasta los 30 años de edad se utilizó un período de tres años entre una iteración y la siguiente, mientras que a partir de los 30 años se utilizó un periodo de 5 años hasta totalizar el desarrollo del rodal. En cada iteración se aplicaron los distintos modelos de crecimiento y se simuló la mortalidad de los árboles de menor clase social hasta volver al 100% de ocupación del rodal (IDR_{max}). Posteriormente se reasignaron nuevas clases sociales a los

individuos remanentes de manera de alcanzar los valores porcentuales de AB de cada clase social y se procedió a una nueva iteración.

Luego de las simulaciones se evaluaron diferentes variables estructurales de los rodales simulados a lo largo de gradientes de edad y de calidad de sitio. Las variables estructurales consideradas fueron: diámetro cuadrático medio (DCM), altura dominante (HD), densidad (N), mortalidad, área basal (AB) y volumen total con corteza por hectárea (VTCC). A partir de las variables DCM, HD, AB y VTCC se calcularon los correspondientes incrementos periódicos anuales (IPA) de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$IPA_{ij} = \frac{I_{ij}}{P_{ij}}$$

Donde: I_{ij} incremento de la variable para el periodo ij ; P_{ij} número de años del período ij .

La variable VTCC también se analizó utilizando el incremento medio anual (IMA), de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$IMA_j = \frac{H_j}{t_j}$$

Donde: H_j dimensión de la variable en el tiempo j ; t_j edad correspondiente a tiempo j .

6.3. Resultados

Los parámetros propuestos para las ecuaciones del modelo de densidad relativa fueron los siguientes:

DCM < 10 cm	a = 4,582933	b = 0,630141	c = 3,168735
DCM 10 – 39,99 cm	a = 897000	b = 2,00	
DCM > 39,99 cm	a = 8,7282	b = 0,0599952	

De acuerdo al modelo propuesto, un rodal de *N. antarctica* con un DCM de 1 cm parte de una densidad cercana a 38 mil individuos por hectárea. Su área basal aumenta paulatinamente acompañada de una creciente mortalidad hasta alcanzar los 10 cm de DCM y 8970 ind.ha⁻¹ de densidad. Luego, los rodales alcanzan una densidad relativa máxima que se mantiene estable hasta alcanzar los 40 cm de DCM con una densidad de 560 ind.ha⁻¹. Luego de alcanzados los 40 cm, ya en la fase de desmoronamiento, el AB disminuye gradualmente hasta alcanzar un DCM de 60 cm y una densidad de 169 ind.ha⁻¹ (Figura 6.3).

Según el modelo propuesto el índice de densidad relativa de referencia (IDR_{25}) es de 1435 ind. ha^{-1} .

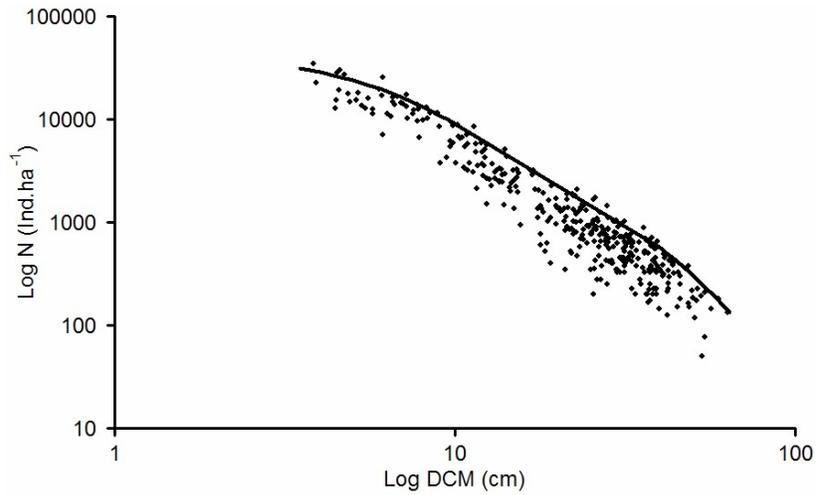


Figura 6.3. Modelo de índice de densidad relativa para rodales de *N. antarctica*.

Donde: Log N: Logaritmo en base 10 de la densidad; Log DCM: Logaritmo en base 10 del diámetro cuadrático medio.

El modelo de descuento de la altura dominante (Apartado 6.2.2.) presentó un coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$) de 68,4, un error promedio de 0,05 % y un error promedio absoluto de 7,57 %. Las curvas del modelo de descuento de la altura dominante (Figura 6.4) mostraron la disminución en la altura de los individuos a medida que disminuyó la clase social para todas las calidades de sitio. Asimismo, se observó una mayor diferenciación porcentual entre clases sociales a medida que disminuyó la calidad de sitio, siendo la diferencia de altura porcentual entre individuos suprimidos y dominantes mayor en la clase de sitio S I que en la clase de sitio S V.

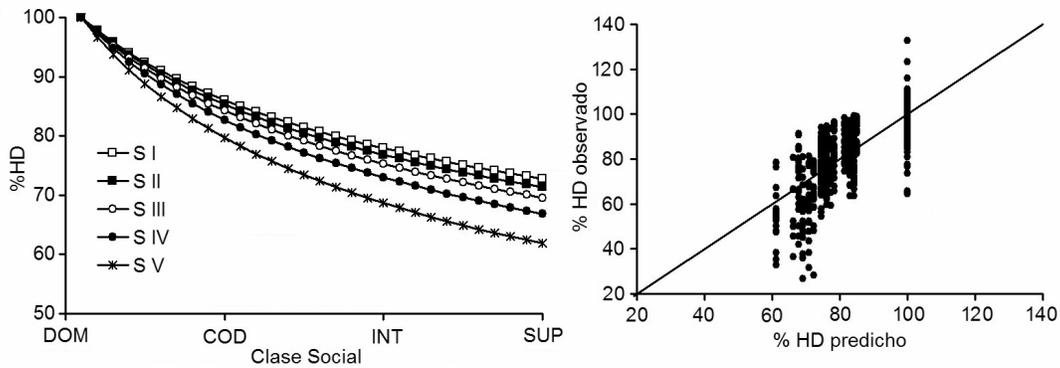


Figura 6.4. Modelo de descuento de la altura dominante y distribución de residuos.

Donde: %HD: porcentaje de la altura dominante; DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: intermedios SUP: suprimidos.

El rodal inicial, presentó una distribución diamétrica similar a una jota invertida con un DCM de 3,3 cm, en que la mayor cantidad de árboles se presentan en las menores clases diamétricas, disminuyendo gradualmente la cantidad, conforme disminuye el diámetro. Los individuos dominantes ocuparon las clases diamétricas superiores (>4,0 cm), los codominantes y los intermedios ocuparon las clases diamétricas intermedias (de 2,1 a 5,0 cm) y los individuos suprimidos fueron representados por los árboles de las menores clases diamétricas (<3,0 cm) (Figura 6.5). Expresado como porcentaje del AB, los árboles dominantes representaron el 38% del AB, los codominantes el 32%, los intermedios el 22% y los suprimidos el 9%.

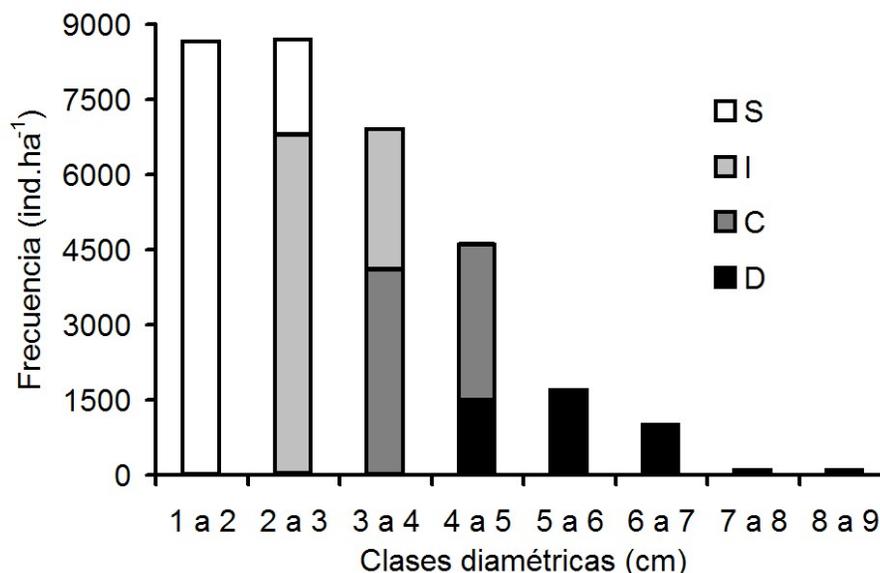


Figura 6.5. Distribución diamétrica del rodal inicial utilizado en las simulaciones discriminado por clases sociales. D: dominantes; C: codominantes; I: intermedios S: suprimidos.

La evolución del diámetro cuadrático medio (DCM) del rodal, de acuerdo a la simulación realizada, aumentó con la edad y la calidad de sitio (Figura 6.6) mostrando un desarrollo que se corresponde con los modelos de crecimiento diamétrico previamente ajustados (Capítulo IV). Con la diferencia, de que en este caso, el DCM del rodal se vio modificado por la mortalidad, que se produce en los individuos de menor clase social.

Los incrementos en DCM (Inc DCM) también se correspondieron con las calidades de sitio, presentándose siempre mayores valores en las mejores calidades de sitio. Los máximos valores de Inc DCM ocurrieron de manera más temprana en la calidad de sitio S I (27 años con 0,48 cm.año⁻¹) que en la calidad de sitio media (S III) (30 años con 0,41 cm.año⁻¹) y que en la calidad de sitio baja (S V) (40 años con 0,29 cm.año⁻¹) (Figura 6.7).

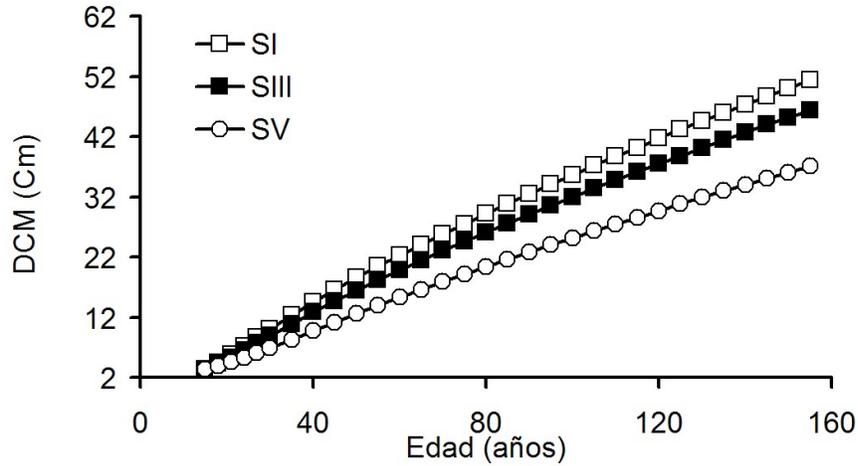


Figura 6.6. Evolución de diámetro cuadrático medio (DCM) en las diferentes calidades de sitio.

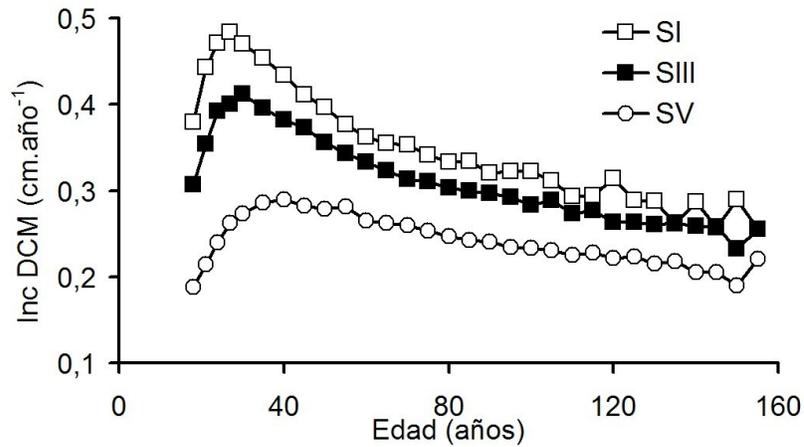


Figura 6.7. Evolución del incremento anual del diámetro cuadrático medio del rodal en diferentes calidades de sitio.

La altura dominante de los rodales se correspondió con las curvas del modelo de Newnham de calidad de sitio desarrollado anteriormente (Capítulo II - Apartado 2.2.3.) (Figura 6.8). Las mayores tasas de crecimiento se dieron en las etapas tempranas de desarrollo para alcanzar una asíntota en las edades más avanzadas.

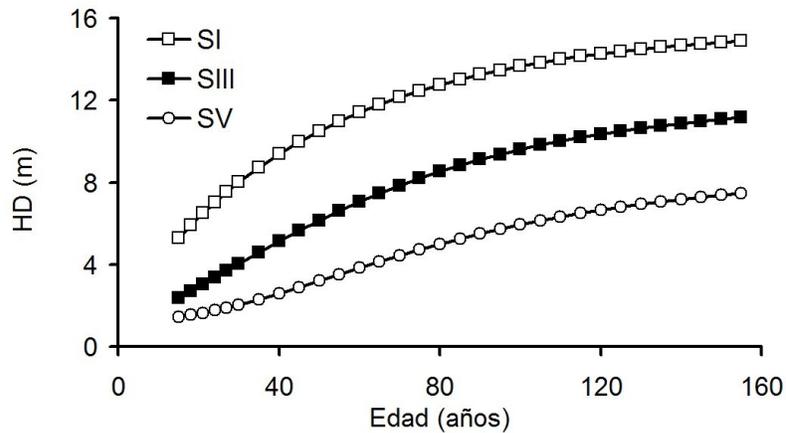


Figura 6.8. Evolución de la altura dominante del rodal en las diferentes calidades de sitio.

Al igual que el Incremento diamétrico, el incremento en altura también presentó un desfase en el tiempo entre los valores máximos de las distintas calidades de sitio, registrándose los valores máximos de incremento en altura dominante primero en la mejor calidad de sitio (15 años con $0,21 \text{ m.año}^{-1}$), luego en la calidad de sitio III (27 años con $0,11 \text{ m.año}^{-1}$) y por último en la calidad de sitio V (15 años con $0,06 \text{ m.año}^{-1}$) (Figura 6.9). A partir de los 70 años se produjo un entrecruzamiento de las curvas de incremento en HD tal como fuera explicado en el apartado 2.2.3.

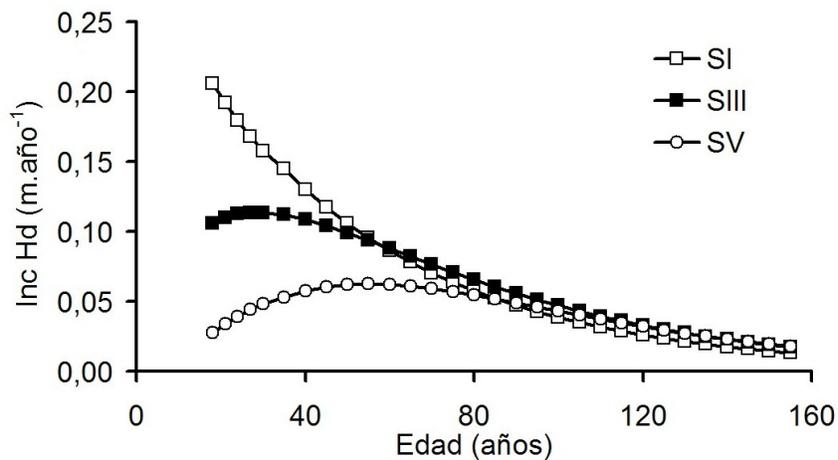


Figura 6.9. Evolución del incremento anual de la altura dominante (Inc HD) del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

Las curvas de densidad partieron todas de un mismo punto debido a que se utilizó la misma estructura inicial para simular el desarrollo de las tres clases de sitio. La densidad disminuyó siguiendo una curva logarítmica, presentándose los mayores valores de densidad

en la calidad de sitio inferior (S V) y los menores valores en la mejor calidad de sitio (S I) (Figura 6.10). En las modelizaciones se partió de 31780 ind.ha⁻¹ a los 15 años de edad y se llegó a una densidad final a los 150 años de 280 ind.ha⁻¹ en S I, 380 ind.ha⁻¹ en S III y de 660 ind.ha⁻¹ en S V.

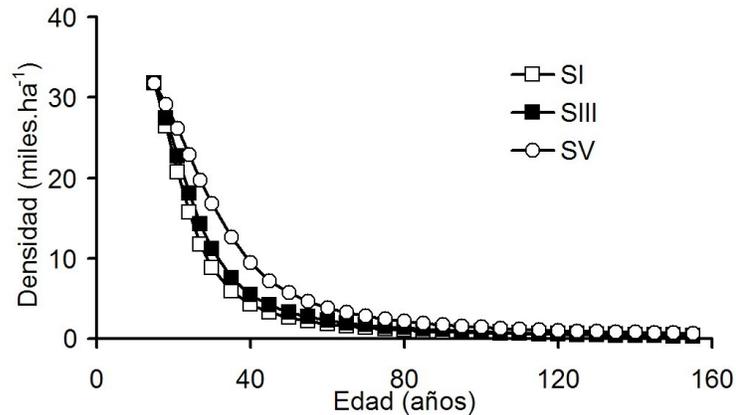


Figura 6.10. Evolución de la densidad de árboles del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

La mortalidad presentó para todas las calidades de sitio un aumento en la etapa juvenil, hasta alcanzar un máximo a los 27-30 años y luego disminuir gradualmente hasta alcanzar los valores mínimos en las fases de envejecimiento y desmoronamiento (Figura 6.11). En los primeros 30 años de desarrollo, la mortalidad fue directamente proporcional a la calidad de sitio (a mayor calidad de sitio, mayor mortalidad). A partir de los 30 años y hasta el inicio de la fase de envejecimiento, la relación se invirtió registrándose una mayor mortalidad en las menores calidades de sitio. Por otro lado, durante las fases de envejecimiento y desmoronamiento, la mortalidad presentó valores similares para las tres calidades de sitio ensayadas.

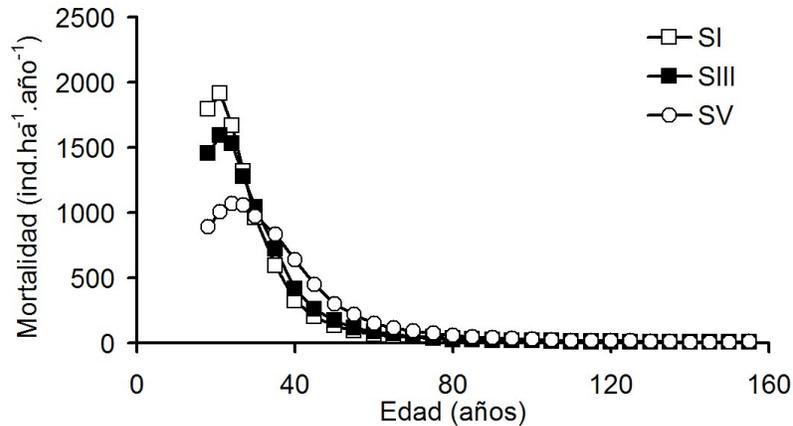


Figura 6.11. Evolución de la mortalidad de árboles del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

El área basal del rodal aumentó rápidamente durante los primeros años de desarrollo del rodal, hasta alcanzar un máximo de $70 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$. Cuanto mayor fue la calidad de sitio, más rápidamente los rodales alcanzaron el área basal máxima. El rodal de mayor calidad de sitio (S I) alcanzó el AB máxima a los 30 años, mientras que los rodales de clase de sitio S III y S V demoraron 35 y 40 años respectivamente. El AB se mantuvo estable, pero a partir de los 120 años de edad se produjo una disminución del AB en S I y S III, alcanzando a los 155 años de edad, valores de $58 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ y $64 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ en S I y S III, respectivamente (Figura 6.12).

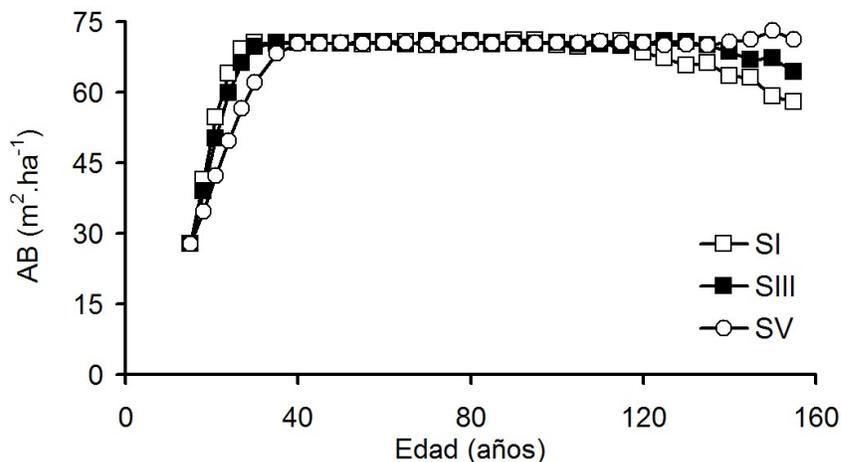


Figura 6.12. Evolución del área basal (AB) del rodal en diferentes clases de sitio (S).

El incremento en área basal (Inc AB) fue máximo en los primeros años de desarrollo del rodal para todas las calidades de sitio, registrándose los valores más elevados entre los

15 y los 18 años (Figura 6.13). Hasta los 24 años los mayores incrementos se observan en las mejores calidades de sitio. Pero a partir de esta edad, la relación se invirtió siendo los rodales de menor clase de sitio (S III y S V) los de mayor incremento y los de calidad de sitio S I los de menor Inc AB. Luego de los 40-45 años, los rodales de todas las clases de sitio mantuvieron un valor de Inc AB cercano a cero. Aunque en la fase de desmoronamiento se registraron algunos valores negativos de incremento principalmente en las mejores calidades de sitio, así como también, se produjeron pequeños aumentos.

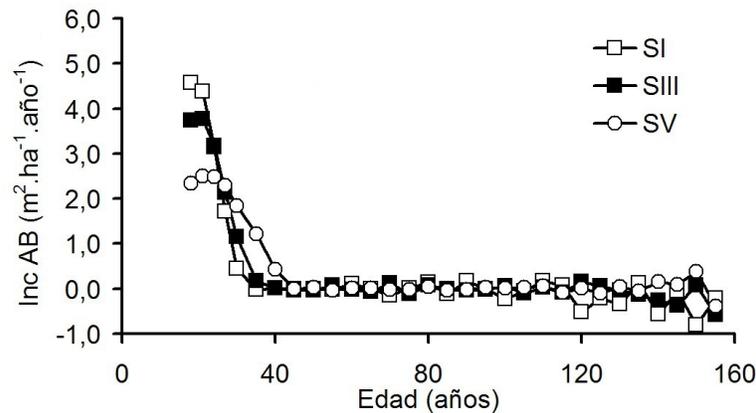


Figura 6.13. Evolución del incremento anual del área basal (Inc AB) del rodal en diferentes clases de sitio (S).

El valor de volumen total con corteza (VTCC) fue directamente proporcional a la calidad de sitio a lo largo de todo el desarrollo del rodal (Figura 6.14). Los valores máximos se registraron en las fases de envejecimiento y desmoronamiento, presentándose dicho valores de manera más temprana en la mejor calidad de sitio ($499 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a los 115 años), luego en la calidad de sitio S III ($408 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a los 130 años) y por último en la calidad de sitio S V ($319 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a los 150 años). Una vez alcanzado el valor máximo de VTCC, se observaron disminuciones en las tres calidades de sitio, arribando al final de las modelizaciones a valores de $433 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en S I, $389 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en S III y $315 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en S V.

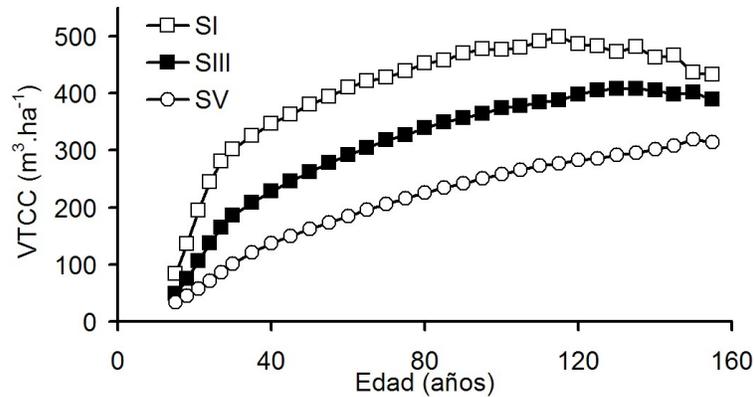


Figura 6.14. Evolución del volumen total con corteza (VTCC) del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

El incremento del VTCC analizado a partir del incremento periódico anual (IPA) y el incremento medio anual (IMA) se diferenció entre las tres calidades de sitio ensayadas (Figura 6.15). El IPA máximo se produjo con anterioridad en la calidad de sitio S I ($19,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a los 21 años) respecto de las calidades S III ($10,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a los 24 años) y S V ($4,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a los 27 años). Por otro lado, el cruce entre las curvas de IPA e IMA, que se produce en el punto de máximo IMA, ocurrió primero en la calidad de sitio S I (25 años), luego en S III (28 años) y por último en S V (34 años). En estos puntos, que correspondieron al máximo rendimiento forestal, el VTCC fue de $256,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $171,87 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y $117,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ para las clases de sitio S I, S III y S V, respectivamente.

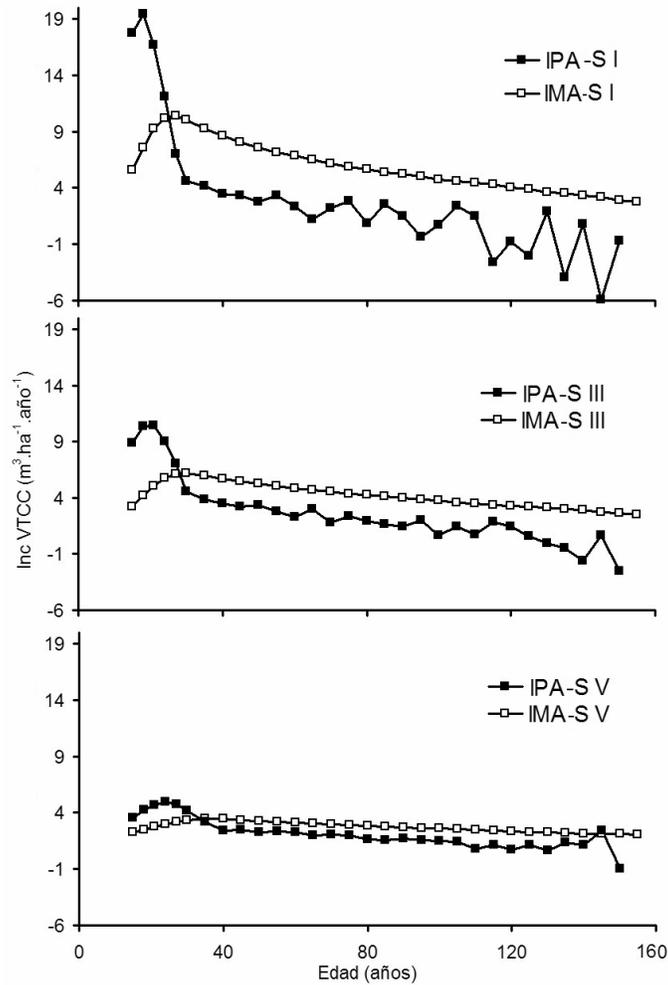


Figura 6.15. Incremento anual medio (IMA) e incremento anual periódico (IPA) del volumen total con corteza (VTCC) para diferentes calidades de sitio (S).

6.4. Discusión

El modelo de índice de densidad de rodal fue adecuado al ploteo de parcelas de la base de datos usada (Figura 6.3). Si bien la pendiente de -2 utilizada en el presente modelo es superior a la pendiente de -1.605 que Reineke (1983) consideraba universal, dicho valor se encontró en el rango de otros modelos de densidad de rodal (Bravo et al., 1997). Desde el punto de vista biológico, este modelo expresa la relación entre la mortalidad y el crecimiento. En este sentido, una pendiente más pronunciada indica una menor tasa de crecimiento que pendientes más suaves. Por otro lado, desde el punto de vista práctico el modelo de densidad de rodal resulta de utilidad para la confección de diagramas de manejo, los cuales permiten ajustar la densidad de los rodales de acuerdo a las necesidades de los silvicultores.

La estructura original donde la mayor cantidad de individuos correspondieron a árboles de diámetros pequeños que pertenecen a las clases sociales suprimidas, representa un fenómeno corriente para especies de tolerancia media o intolerantes a la sombra (Oliver & Larson, 1996). Un ejemplo de esto fue registrado por Navarro *et al.* (1999) para renovales de *Drimys winteri* donde las distribuciones diamétricas fueron de tipo J invertida, con una enorme cantidad de individuos en las clases inferiores, a pesar de tratarse de rodales coetaneos.

Las modelizaciones presentadas en este capítulo permitieron distinguir tres etapas en el desarrollo de los rodales de *N. antarctica* diferenciadas por sus tasas de mortalidad y crecimiento. En la primera etapa predominó el autorraleo. Esta etapa se caracterizó por el cierre del dosel y la intensificación de las relaciones de competencia por diversos recursos, dando lugar a una fuerte mortalidad. Dicha mortalidad estuvo en estrecha relación con el elevado crecimiento de los árboles, produciéndose un aumento en el AB del rodal. La etapa siguiente fue de estabilización, donde la mortalidad, que fue leve y tendió a producir una disminución del AB que al mismo tiempo fue compensada por el crecimiento en diámetro de los árboles, permaneciendo de esta manera, el valor del AB constante a lo largo de este período. La tercera etapa se caracterizó por un crecimiento mínimo, al igual que la mortalidad, y donde se produjeron disminuciones en AB que pueden ser explicadas por la dinámica de gaps (Veblen, 1989), la cual toma más relevancia en los rodales en fase de desmoronamiento libres de disturbios a gran escala. En nuestras simulaciones, la primer etapa de autorraleo coincidió con la fase desarrollo de crecimiento óptimo inicial. La segunda etapa de estabilización se correspondió con las fases de crecimiento óptimo final y de envejecimiento, mientras que la tercera etapa coincidió con la fase de desmoronamiento.

Los valores de las diferentes variables de estructura forestal obtenidas mediante la simulación fueron equivalentes con las publicadas por otros autores. Reque *et al.* (2007) en un análisis de la estructura de ñirantales en el valle del Río Foyel (Río Negro), determinaron, en un bosque cerrado de ñire, valores medios de 12,5 cm de DM, 5450 ind.ha⁻¹ de N, 71,3 m².ha⁻¹ de AB, 5,5 m de HD y 223 m³.ha⁻¹ de VTCC. Mientras que de acuerdo a las presentes simulaciones, un rodal perteneciente a la calidad de sitio S III con un DM equivalente al obtenido por Reque *et al.* (2007) (12,8 cm), presentaría valores de 5460 ind.ha⁻¹ de N, 70,5 m².ha⁻¹ de AB, 4,3 m de HD y 228 m³.ha⁻¹ de VTCC. Dicha estructura corresponde a un rodal en fase de crecimiento óptimo final. En la provincia de Santa Cruz, Peri *et al.* (2008) en un bosque primario de ñire con una cobertura de copas del 75% determinaron valores 32 cm de DM, 746 ind.ha⁻¹ de N, 63,6 m².ha⁻¹ de AB, 11,7 m de HD y 418 m³.ha⁻¹ de VTCC. Mientras que a partir de las simulaciones, un rodal de S III con un DCM equivalente (32 cm) al obtenido por Peri *et al.* (2008), pero con una densidad

relativa del 100%, presentaría valores de 880 ind.ha⁻¹ de N, 70,5 m².ha⁻¹ de AB, 9,6 m de HD y 476 m³.ha⁻¹ de VTCC.

Las simulaciones también permitieron dimensionar el efecto de la calidad de sitio sobre las distintas variables estructurales de los rodales. Si bien, es conocido para una gran cantidad de especies forestales que la calidad de sitio influye de manera importante en las variables estructurales del bosque, es importante destacar que en los bosques de ñire de Patagonia sur esta variable no es considerada en los planes de manejo forestales. Por un lado, mientras mayor fue la calidad de sitio, los rodales presentaron mayores valores de HD, DCM y de VTCC como ya fue explicado anteriormente (ver capítulos II, IV y V). Otro punto a destacar es el menor tiempo requerido en las mejores calidades de sitio para alcanzar máximos valores de HD, DCM, AB y VTCC. Así como también, los rodales de mejor calidad de sitio alcanzaron el punto de máximo rendimiento forestal (punto en que se igualan el IMA y el IPA) de manera más temprana que los rodales de peor calidad de sitio. Resultados equivalentes fueron obtenidos por Shater et al. (2011) simulando el desarrollo de rodales coetáneos de *Pinus brutia* de diferentes calidades de sitio, en los que registró puntos de máximo rendimiento forestal que ocurrieron a las edades de 45, 60 y 80 años para las calidades de sitio buena, regular y mala respectivamente. Cabe aclarar que conocer dicho punto de máximo rendimiento forestal tiene utilidad en aquellos bosques o plantaciones donde se busca maximizar la producción en volumen de un rodal, sin importar el tamaño de los árboles a cosechar (por ejemplo, plantaciones forestales destinadas a la industria celulósica). En los bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur, donde un posible destino de la madera es el aserrado (Martínez Pastur et al., 2008b) o la obtención de postes y varas (Peri et al., 2009), el punto de máximo rendimiento forestal no debe ser considerado. Ya que los turnos de corta se definen en función del tamaño que alcanzan los árboles de un rodal, teniendo en cuenta los requerimientos de la industria de destino. Sin embargo, dicho punto da un indicio de la capacidad productiva de los bosques de *N. antarctica*, y de cómo pueden variar los turnos de cosecha en función de la calidad de sitio.

Otro aspecto a considerar de las simulaciones realizadas en el presente capítulo es el alto grado de compatibilidad que presentan los diferentes modelos desarrollados en los capítulos precedentes. Estos modelos, habían sido evaluados individualmente, pero sin considerar su comportamiento de manera integrada. En el presente capítulo se logró modelar el desarrollo de un rodal a partir de modelos que describen facetas particulares de la dinámica del bosque (e.g., dinámica de copas, crecimiento, mortalidad). En la bibliografía, se cuenta con algunos antecedentes de estudios que cubren diversos aspectos de la biometría de los bosques de *N. antarctica*. Dichos estudios suelen ser propuestas de modelos o clasificaciones de sitio que presentan poca o nula compatibilidad entre si. Por ejemplo, Martínez Pastur et al. (1997) desarrollaron una clasificación de las HD en bosques

de *N. antarctica* de tres rangos de HD (5,5 m a 8,0 m, 8,1 m a 10,5 m y 10,6 m a 13,0 m), a partir de la cual ajustaron modelos de crecimiento diamétrico. Lencinas et al. (2002) propusieron una clasificación de calidades de sitio basada en cinco rangos de alturas dominantes que van desde HD menores a 6 m hasta valores mayores a los 12 m. Utilizando dicha clasificación, los autores propusieron diferentes ecuaciones de volumen. Por otro lado, Reque et al. (2007) trabajando en bosques de *N. antarctica* de Patagonia Norte, donde los DCM de las parcelas muestreadas variaron entre 10 y 32 cm, desarrollaron ecuaciones locales de volumen. Estos antecedentes mencionados, presentan resultados satisfactorios bajo las condiciones particulares de cada estudio, pero no son altamente compatibles con otros estudios que abarquen otros aspectos de la biometría de los bosques de *N. antarctica*.

Las simulaciones mostraron que los bosques de ñire alcanzan menores volúmenes en comparación con otros bosques de *Nothofagus*. Sin embargo, los bosques de *N. antarctica* pertenecientes a la mejor calidad de sitio, alcanzan volúmenes por hectárea similares a los que presentan los bosques de *N. pumilio* de menor calidad de sitio. Por ejemplo un rodal de *N. pumilio* de la peor clase de sitio, con un DCM de 30 cm alcanza un VTCC de 500 m³.ha⁻¹ a los 160 años de edad (Martínez Pastur et al., 2002). Mientras que de acuerdo a las presentes simulaciones, un rodal de S I de 30 cm alcanzaría un VTCC de 458 m³.ha⁻¹ a los 85 años de edad. Cabe destacar que, en Tierra del Fuego, los bosques de *N. pumilio* de incluso la peor calidad de sitio son actualmente aprovechados y destinados a la industria del aserrado (Gea et al., 2004). Al considerar los incrementos volumétricos netos, estos también fueron inferiores a los bosques de *N. pumilio*. Mientras que en la simulaciones para *N. antarctica* se registraron incrementos entre 10,8 m³.ha⁻¹.año⁻¹ y 4,0 m³.ha⁻¹.año⁻¹ para la mejor y la peor calidad de sitio respectivamente. Los bosques de *N. pumilio* presentan incrementos que varían entre 36,6 m³.ha⁻¹.año⁻¹ y 10,9 m³.ha⁻¹.año⁻¹ para la mejor y la peor calidad de sitio respectivamente (Martínez Pastur, 2006).

6.5. Conclusiones Particulares

Los distintos modelos que describen aspectos puntuales de la dinámica de los rodales (e.g., crecimiento en altura, crecimiento diamétrico, modificación de la densidad) muestran un alto grado de compatibilidad. Permitiendo la realización de simulaciones a nivel rodal con una satisfactoria significancia biológica. Dichas simulaciones permiten el análisis más preciso del desarrollo de los rodales permitiendo predecir la intensidad de las variaciones estructurales de los diferentes bosques de ñire bajo dinámica natural.

Las estructuras forestales determinadas a partir de las simulaciones presentan características comparables con rodales de ñire medidos en distintas etapas de su desarrollo en distintos sitios de Patagonia Sur.

Resulta indispensable, para un mejor manejo de los bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur, considerar la calidad de sitio en la planificación de manejo forestal. Ya que, de esta depende la productividad del rodal, así como también determina el tiempo que demandará obtener dicha producción.

CAPÍTULO VII

Conclusiones generales

Los distintos análisis realizados en la presente Tesis permitieron ponderar el efecto de los gradientes de calidad de sitio y de edad sobre las diferentes variables a nivel rodal e individual en bosques de *N. antarctica*. Considerando estos gradientes, fue posible desarrollar modelos biométricos que expliquen satisfactoriamente las variables necesarias para modelar la dinámica de un bosque natural de *N. antarctica* sin manejo silvícola.

Las ecuaciones de crecimiento en altura e índice de sitio permitieron modelar la influencia de la calidad de sitio y la edad sobre la altura dominante, la cual está en estrecha relación con la productividad de los bosques. El ajuste de dichas ecuaciones, en términos de calidad y comportamiento biológico, depende de los distintos tipos de modelos, incluyendo los diferentes parámetros de edad base que emplean y la calidad de los datos obtenidos. En base a la ecuación de Newnham fue posible desarrollar una nueva clasificación de calidades de sitio para los bosques de *N. antarctica* de Patagonia Sur, con un mejor ajuste y prestaciones que las desarrolladas hasta el presente. Estos modelos también permitieron evaluar las tasas de crecimiento en altura de los bosques de ñire, las cuales son menores a las de otros bosques del género *Nothofagus*. Asimismo, a partir de estas ecuaciones, se pudo determinar que los bosques de ñire alcanzan la madurez a edades más tempranas que otros bosques de la región, mostrando signos de madurez a partir de los 75-80 años y superando los 200 años en pocas ocasiones.

Los bosques de *N. antarctica* presentaron una gran variabilidad en la estructura forestal a lo largo de los gradientes de calidad de sitio y de edad. El análisis de la estructura forestal puso en evidencia las variaciones de las diferentes variables en un gradiente de calidad de sitios y edades, tanto cuantitativas como cualitativas, y a nivel individual como a nivel rodal. Algunas variables presentaron variaciones tanto a lo largo del gradiente de calidad de sitio como del gradiente edad (e.g., DM, AB, VTCC). Sin embargo otras, solo se vieron modificadas a lo largo un solo gradiente (e.g., la densidad a lo largo de la calidad de sitio). A su vez los patrones de variación registrados en algunas variables cuantitativas a lo largo de la edad no fueron constantes entre las diferentes calidades de sitio (e.g., HD).

Las variables cuantitativas de los árboles (sanidad y forma), al igual que las cualitativas, guardaron una estrecha relación con la capacidad maderable de los individuos, que sumada a que la proporción de individuos con buena sanidad y forma variaron entre las diferentes calidades de sitio y que las diferentes dimensiones de los árboles lo hicieron a lo largo de este gradiente, determinó una gran variabilidad en el valor que tienen los diferentes

rodales para la actividad maderera de acuerdo a su calidad de sitio. Permitiendo de esta manera dimensionar de una manera mas precisa el valor maderero de los diferentes rodales de *N. antarctica* de Patagonia Sur. Las variaciones registradas para las diferentes variables a lo largo de los gradientes de edad y calidad de sitio, fueron el principal fundamento para incorporar dichos gradientes en las modelizaciones del crecimiento y la producción.

El crecimiento diamétrico individual guardó una estrecha relación no solo con la calidad de sitio, sino también con la clase social. La familia de ecuaciones individuales de crecimiento diamétrico que se ajustó en función de esta relación tuvo estadísticos satisfactorios y comparables con modelos similares a los desarrollados para otros bosques. Sin embargo, el comportamiento biológico fue deficiente con presencia de entrecruzamientos de curvas y tasas de crecimiento que no se correspondían con los gradientes analizados (clases sociales, calidad de sitio y edad). El desarrollo del modelo integral de crecimiento diamétrico que incorpora los gradientes analizados (edad, clase social y calidad de sitio) en una sola ecuación, representó una simplificación en el cálculo del crecimiento diamétrico, la cual no afectó el ajuste del modelo ni la precisión de la estimación. Por otro lado, con el empleo de este modelo se mejoró el comportamiento biológico, evitando las incongruencias observadas en la familia de ecuaciones individuales de crecimiento diamétrico.

Los diferentes modelos de volumen total ajustados en la presente tesis permitieron entender la relación existente entre el volumen y diferentes variables estudiadas (e.g., DAP, HT, AB) a lo largo de los gradientes de calidad de sitio y edad. A su vez, las distintas metodologías empleadas pusieron en consideración el equilibrio entre el ajuste y el costo en la toma de datos de las variables independientes. De acuerdo a las necesidades de investigación o de manejo forestal, es posible seleccionar modelos que se adecúen a diferentes escalas de aplicación (a nivel individual, local o regional) y a distintos tipos de muestreo. A partir de los modelos desarrollados fue posible determinar el volumen total de los bosques de ñire utilizando información obtenida a partir de inventarios forestales.

A partir del modelo de relación de Inc. VTCC/AB fue posible determinar el incremento volumétrico en rodales de diferentes calidades de sitio a partir de variables de fácil medición o estimación (clase de sitio y edad del rodal). Dicho modelo determinó incrementos volumétricos para rodales de *N. antarctica* de las mejores calidades de sitio similares a los registrados en rodales de *N. pumilio* de baja calidad de sitio, los cuales son actualmente aprovechados en la industria maderera por los aserraderos de Tierra del Fuego.

Los diversos modelos desarrollados si bien resultaron satisfactorios desde el punto de vista estadístico y biológico, dejaron pendiente para futuras investigaciones la realización

de validaciones independientes para confirmar el correcto ajuste de las estimaciones realizadas.

Mediante la conjunción de los modelos que describen aspectos individuales de la biometría (crecimiento en diámetro, en altura, densidad, volumen) fue posible simular de manera satisfactoria los cambios en la estructura de los bosques de *N. antarctica* bajo una dinámica natural. Los diferentes modelos empleados en este modelo de producción mostraron un alto grado de compatibilidad que se manifestó a partir de la simulación de la evolución de los rodales con una gran significancia biológica a lo largo de gradientes de sitios. Los parámetros de estructura forestal que arrojó el modelo de producción estuvieron dentro del rango de valores mensurados para la especie en una amplia gama de condiciones de rodal de los bosques de *N. antarctica*.

Estas simulaciones permitieron diferenciar las desiguales potencialidades productivas que presentaron los bosques de *N. antarctica* dependiendo de su calidad de sitio y edad. Asimismo, también fue factible determinar la posibilidad forestal y los tiempos que se requirieron para alcanzar los máximos niveles de productividad de los rodales en función de su calidad de sitio. Este tipo de simulaciones puede resultar una herramienta útil para la planificación forestal, permitiendo predecir la evolución de un rodal considerando de manera integrada numerosas variables de la estructura forestal (edad, densidad, diámetro, altura, clases sociales, volumen).

La base biométrica desarrollada en la presente Tesis, brinda diversas herramientas para predecir el estado y el crecimiento de los árboles y rodales de *N. antarctica* que se encuentran bajo dinámica natural, libres de disturbios catastróficos y de efectos antrópicos como el manejo forestal. Los modelos desarrollados pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones de crecimiento, dinámica y productividad de estos bosques. Constituye un desafío a futuro, el diseño y ajuste de modelos biométricos que permitan predecir la dinámica de los rodales en un marco de manejo forestal. Desarrollar este tipo de modelos representa mayores dificultades e involucrará la incorporación de nuevas variables (e.g., intensidad de las intervenciones silvícolas). Una de las mayores dificultades que actualmente se presentan para ajustar modelos predictivos que contemplen la implementación de actividades silvícolas en rodales de ñire, es la falta de bosques bajo regímenes de manejo forestal que sirvan para poder observar las variaciones en las relaciones de las distintas variables biométricas. Por este motivo, la evolución de estos modelos deberá estar ligada a la implementación generalizada de actividades silvícolas en los bosques de ñire de Patagonia Sur. Asimismo, el desarrollo de estos modelos, también deberá ser acompañado por la instalación de redes de parcelas permanentes que abarquen un gradiente geográfico y de calidades de sitio, las cuales permitan la realización de ensayos a mediano y largo plazo en las que se practiquen diversas alternativas silvícolas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alvarado Ojeda, A.J. 2006. Determinación del estado sanitario de los bosques de ñirre (*Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oersted) en la XI región. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.
- Andreassen, K., S.M. Tomter. 2003. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. *Forest Ecology and Management* 180: 11-24.
- Armesto, J.J., I. Casassa, O. Dollenz. 1992. Age structure and dynamics of Patagonian beech forests Torres del Paine Natural Park, Chile. *Vegetatio* 98: 367-376.
- Bitterlich, W. 1984. The relascope idea. Relative measurements in forestry. Commonwealth Agricultural Bureaux. Londres, Inglaterra. 242 pp.
- Bravo, F., G. Montero, M. del Rio. 1997. Índice de densidad de las masas forestales. *Ecología* 11.
- Bravo, F., J. G. Alvarez-Gonzalez, M. del Rio, M. Barrio, J. A. Bonet, A. Bravo-Oviedo, R. Calama, F. Castedo-Dorado, F. Crecente-Campo, S. Condes, U. Dieguez-Aranda, S. C. Gonzalez-Martínez, I. Lizarralde, N. Nanos, A. Madrigal, F. J. Martinez-Millan, G. Montero, C. Ordoñez, M. Palahi, M. Pique, F. Rodriguez, R. Rodriguez-Soalleiro, A. Rojo, R. Ruiz-Peinado, M. Sanchez-Gonzalez, A. Trasobares, J. Vazquez-Pique. 2011. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectivas. *Forest Systems* 20(2): 315-328.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Estimación del volumen. Vol 22/1. FAO-Roma. 92 pp.
- Carabelli, F. 1991. Estudio bibliográfico sobre lenga (*Nothofagus pumilio*) con énfasis en aspectos de dinámica y manejo del bosque. Universidad Nacional de la Patagonia - Centro de Investigaciones Forestales. 32 pp.
- Chauchard, L. 1991a. Familia de funciones de volumen de lenga (*Nothofagus pumilio*). Actas VI Jornadas Técnicas: Inventarios – Modelos de producción y crecimientos forestales. Eldorado, Misiones (Argentina). Pp 26-39.
- Chauchard, L., R. Sbrancia. 2003. Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*. *Bosque* 24(3): 3-16.
- Chen, H.Y.H., K. Klinka, R.D. Kabzems. 1998. Height growth and site index and site index models for trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in northern British Columbia. *Forest Ecology and Management* 102: 157-165.
- Clutter, J.L., J.C. Fortson, L.V. Pienaar, G.H. Brister, R.L. Bailey. 1983. Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons, New York. 333 pp.

- Crecente-Campo, F., P. Soares, M. Tomé, U. Diéguez-Aranda. 2010. Modelling annual individual-tree growth and mortality of Scots pine with data obtained at irregular measurement intervals and containing missing observations. *Forest Ecology Management* 260: 1695-1974.
- Curtis, R.O., D.J. DeMars, F.R. Herman. 1974. Which dependent variable in site index-height-age regression? *Forest Science* 20: 74-87.
- DeRose, R.J., R.S. Seymour. 2009. The effect of site quality on growth efficiency of upper crown class *Picea rubens* and *Abies balsamea* in Maine, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 39(4): 777-784.
- Díaz, B., P. Peri, G. Martínez Pastur. 1998. Crecimiento diamétrico en bosques de lenga en sitios de calidad IV de Patagonia Sur. Actas Primer Congreso Latinoamericano de IUFRO. Valdivia (Chile), 22-28 Noviembre. 11 pp.
- Dobbertin, M. 2005. Tree growth as indicador of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest research* 124: 319-333.
- Donoso, P., R. Monfil, L. Otero, L. Barrales. 1993. Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las provincias de Cautín y Valdivia. *Ciencia e Investigación Forestal* 7(2): 253-287.
- Donoso, C. 2006. Las especies arbóreas de los bosques Templados de Chile y Argentina. Autoecología. 3rd ed. Marisa Cuneo Ediciones, Valdivia, Chile. 678 pp.
- Drobyshev, I., H. Linderson, K. Sonesson. 2007. Relationship between crown condition and tree diameter growth in southern Swedish oaks. *Environmental and monitoring Assessment* 128: 61-73
- Ek, A. 1971. A formula fir white spruce site index curves. University Wisconsin Forestry Research Notes N°161, 2 pp.
- Esse, C.R., C.O. Navarro, J.C. Pinares. 2007. Site index curves for *Nothofagus dombeyi* in the pre-Andean mountains of the province of Cautín, IX Region, Chile. *Bosque* 28(2): 142-151.
- Everard, J., J.M. Christie. 1995. Sweet chestnut: silviculture, timber quality and yield in the forest of Dean. *Forestry* 68(2): 133-144.
- Fekedulegn, D., M.P. Mac Siurtain, J.J. Colbert. 1999. Parameter estimation of nonlinear growth models in forestry. *Silva Fennica* 33(4): 327-336.
- Fernández, C., G. Martínez Pastur, F. Boyeras, M. Alloggia, R. Vukasovic. 1995. Estimación de la producción para ñire en Tierra del Fuego: 1. Análisis de forma y ecuaciones locales de volumen para diferentes condiciones de sitio. Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas. Pp 137-144. San Martín de los Andes, 24-27 Octubre.
- Fox, J.C., H. Bi, P.K. Ades. 2008. Modelling spatial dependence in an irregular natural forest. *Silva Fennica* 42(1): 35-48.

- 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. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1095-1102.
- Frangi, J.L., M.D. Barrera, J. Puig de Fábregas, P.F. Yapura, A.M. Arambarri, L. Richter. 2004. Ecología de los bosques de Tierra del Fuego. En Arturi, M.F., J.L. Frangi, J.F. Goya (eds) *Ecología y manejo de los bosques nativos de Argentina*. Presentación multimedia en CD. Editorial Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Fucaraccio, F., G. Staffieri, E. Wäbo. 1999. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina. Informe Técnico UNLP. 26 pp.
- Gadow, K., O.S. Sánchez, G.J.G. Álvarez. 2007. Estructura y crecimiento del bosque Retrieved from http://www.iww.forst.unigoettingen.de/doc/kgadow/lit/kvg_estructura_y_crecimiento_del_bosque.pdf
- García, O. 1983. A stochastic differential equation model for the height growth of forest stands. *Biometrics* 39: 1059-1072.
- García, O. 1988. Growth modelling - A (re)view. *New Zealand Forestry* 33 (3): 14-17.
- Gatzojannis, S. 2000. Site-index model for *Abies chephalonica* in the Mount Taygetos forests in Greece. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 326-333.
- Gea, G, G. Martínez Pastur, J.M. Cellini, M.V. Lencinas. 2004. Forty years of silvicultural management in southern *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser primary forest. *Forest Ecology and Management* 2001(2-3): 335-347.
- Gezan, S.A., P.C. Moreno M, A. Ortega, 2009. Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 30(2): 61-69.
- Goelz, J.C.G., T.E. Burk. 1992. Development of a well-behaved site index equation: Jack pine in north central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 776-784.
- Gracia C. 2001. Presente y futuro del bosque mediterráneo: Balance de carbono, gestión forestal. En: *Ecosistemas mediterráneos: análisis funcional*. Zamora R., F. Pugnaire (coordinadores). Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Asociación Española de Ecología Terrestre. ISBN: 84-00-079078. pp: 351-372.
- Gregoire, T. 1993. Estimation of forest growth from successive surveys. *Forest Ecology and Management* 56: 267-278.
- Gregoire, T.G., H.T. Valentine, G.M. Furnival. 1986. Estimation of bole volume by importance sampling. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 554-557.
- Gregoire, T.G., H.T. Valentine, G.M. Furnival. 1987. Sampling methods for tree volume and volume increment. *Forest Ecology and Management* 21:311-323.
- Gustafsson, L., S. Baker, J. Bauhus, W. Beese, A. Brodie, J. Kouki, D. Lindenmayer, A. Löhmus, G. Martínez Pastur, C.H. Messier, M. Neyland, B. Palik, A. Sverdrup-

- Thygeson, J. Volney, A. Wayne, J. Franklin. 2012. Retention forestry to maintain multifunctional forests: a World perspective. *Bioscience* 62(7): 633-645.
- Gyenge, J., M.E. Fernández, M. Sarasola, M. de Urquiza, T. Schlichter. 2009. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y volumen de fuste de algunas especies leñosas natives en el valle del río Foyel, NO de la Patagonia Argentina. *Bosque* 30(2): 95-101.
- Hari, P. 1996. Idealization and concretization in construction of models applied to forest growth. *The Science of the Total Environment* 183: 179-185.
- Hasenauer, H., R. Monserud, T.G. Gregorio. 2000. The simultaneous nature of tree growth models. En *Quantifying Spatial Uncertainty in Natural Resource*. (H.T. Mowrer y R.G. Congalton, eds) Ann Arbor Press. Pp. 171-181.
- Howard, T.M. 1983. Accelerated tree death in mature *Nothofagus cunninghamii* Oerst. Forest in Tasmania. *Victorian Naturalist* 90: 343-435
- Husch, F., C.I. Miller, T.W. Brees. 1982. *Forest mensuration*. Third Edition. New York. John Wiley & Sons. 402 pp.
- Hyink, D.M., S.M. Zedaker. 1987. Stand dynamics and the evaluation of forest decline. *Tree Physiology* 3: 17-26.
- Ivancich, H.S., R. Soler Esteban, G. Martínez Pastur, P. Peri, H. Bahamonde. 2009. Índice de densidad de rodal aplicado al manejo silvopastoril en bosques de ñire (*Nothofagus antarctica*) en Patagonia Sur. Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles 2009, Posadas, Prov. de Misiones, Argentina. 245-250.
- Ivancich, H.S., G. Martínez Pastur, J.M. Cellini, M.V. Lencinas, P.L. Peri. 2010a. Stand growth model for *Nothofagus Antarctica* primary forests. VI Southern Connection Congress, 15-19 February 2010, Bariloche, Argentina.
- Ivancich, H.S., G. Martínez Pastur, P.L. Peri, R. Soler-Esteban, M.V. Lencinas. 2010b. Primeros resultados de raleos en bosques de *Nothofagus antarctica* para el manejo silvopastoril en Tierra del Fuego (Argentina). I Congreso internacional Agroforestal Patagónico. 27 a 29 de octubre de 2010, Coyhaique, Chile.
- Ivancich, H.S., G. Martínez Pastur, J.M. Cellini, P.L. Peri, R. Soler-Esteban, M.V. Lencinas. 2010c. Definición de las fases de desarrollo y estimación del crecimiento de bosques de *Nothofagus antarctica* (ñire) a lo largo de gradientes de calidad de sitio. Jornadas Forestales de la Patagonia Sur. 10 y 11 de noviembre de 2010, Ushuaia, Tierra del Fuego Argentina.
- Ivancich, H.S., G. Martínez Pastur, P.L. Peri. 2011. Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio en bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur. *Bosque* 32(2): 135-145.
- Ivancich, H.S., G. Martínez Pastur, M.V. Lencinas, R. Soler Esteban, P.L. Peri. 2012. Respuesta del canopeo y crecimiento de *Nothofagus antarctica* bajo manejo

- silvopastoril. II Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles. 9-11 de mayo de 2012. Santiago del Estero, Argentina.
- Kariuki, M., Rolfe, M., Smith, R., Vanclay, J.K., Kooyman, R.M., 2006. Diameter growth performance varies with species functional-group and habitat characteristics in subtropical rainforests. *Forest Ecology and Management* 225: 1-14.
- Khamis, A., I. Zuhaimy, H. Khalid. 2005. Nonlinear growth models for modeling oil palm yield growth. *Journal of Mathematics and Statistics* 1(3): 225-233.
- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 365 p.
- Knowe, S.A., G.R. Ahrens, D.S. Debell. 1997. Comparison of diameter-distribution-prediction, stand-table-proyection and individual-tree-growth modeling approaches for young red alder plantations. *Forest Ecology and Management* 98: 49-60.
- Lei, Y.C., S.Y. Zhang, 2004. Features and partial derivatives if Bertalanffy-Richards growth model in forestry. *Nonlinear Analisis: Modelling and Control* 9(1): 65-73.
- Lencinas, M.V., G. Martínez Pastur, J.M. Cellini, R. Vukasovic, P.L. Peri, C. Fernández. 2002. Incorporación de la altura dominante y la calidad de sitio a ecuaciones estándar de volumen para *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted. *Bosque* 23(2): 5-17.
- Lessard, V.C., R.E. Mc Roberts, M.R. Holdaway. 2001. Diameter growth models using Minnesota forest inventory and analysis data. *Forest Science* 47(3): 301-310.
- Lhotka, J.M., E.F. Loewenstein. 2011. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stand in the Ozark Highlands of Missouri, USA. *Forest Ecology and Management* 261: 770-778.
- Loetsch, F., Zöher, F., Haller, K. 1973. *Forest Inventory*. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 469 pp.
- Lynch, T.B., D. Zhang. 2011. On relative maxima of diameter growth, basal area growth, volume growth, and mean annual increment for individual trees. *Forest Science* 57(4): 353-358.
- Mamo, N., H. Sterba. 2006. Site index functions for *Cupressus lusitanica* at Munesa Shashemene, Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 237: 429-435.
- Manacorda, M., Bonvissuto G. Uso silvopastoril de los bosques de ñire (*Nothofagus antarctica*) en Río Negro, Patagonia Argentina. 2001 *Revista Forestal Centroamericana* 35: 41-44.
- Martínez Pastur, G., C. Fernández, P. Peri, F. Boyeras. 1993. Ecuaciones estándar de volumen total para la lenga (*Nothofagus pumilio*) de la margen sur del lago General Vintter y Cerro Colorado, (Provincia del Chubut), Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 69(1): 5-12.

- Martínez Pastur, G., C. Fernández. 1994. Variación de parámetros estructurales y de composición del sotobosque para bosques de *Nothofagus pumilio* en relación a gradientes ambientales indirectos. *Ciencias Forestales* 9(1-2): 11-22.
- Martínez Pastur, G., C. Fernández, F. Boyeras, M. Alloggia. 1995. Estimación de la producción para ñire en Tierra del Fuego: 2. Ecuaciones estándar de volumen. *Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas*. Pp 145-150. San Martín de los Andes, 24-27 Octubre.
- Martínez Pastur, G., C. Fernández. 1997. Crecimiento diamétrico de *Nothofagus antarctica* en Tierra del Fuego para diferentes sitios y status de competición. *Interciencia* 22(2): 87-91.
- Martínez Pastur, G., P.L. Peri, R. Vukasovic, S. Vaccaro, V. Piriz Carrillo. 1997. Site index equation for *Nothofagus pumilio* Patagonian forest. *Phyton* 61(1/2): 55-60.
- Martínez Pastur, G, P.L. Peri, C. Fernández, G. Staffieri, D. Rodriguez. 1999. Desarrollo de la regeneración a lo largo del ciclo del manejo forestal de un bosque de *Nothofagus pumilio*: 2. Incidencia del ramoneo de *Lama guanicoe*. *Bosque* 20(2): 47-53.
- Martínez Pastur, G., J.M. Cellini, P.L. Peri, R. Vukasovic, C. Fernández. 2000. Timber production of *Nothofagus pumilio* forests by a shelterwood system in Tierra del Fuego (Argentina). *Forest Ecology and Management* 134(1-3): 153-162.
- Martínez Pastur, G., M.V. Lencinas, J.M. Cellini, B. Díaz, P.L. Peri, R. Vukasovic. 2002. Herramientas disponibles para la construcción de un modelo de producción para lenga (*Nothofagus pumilio*) bajo manejo en un gradiente de calidades de sitio. *Bosque* 23(2): 69-80.
- Martínez Pastur, G., M.V. Lencinas, R. Vukasovic, P.L. Peri, B. Díaz, J.M. Cellini. 2004. Turno de corta y posibilidad de los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego (Argentina). *Bosque* 25(1): 29-42.
- Martínez Pastur, G.J. 2006. Biometría y producción forestal para bosques de *Nothofagus pumilio* en Tierra del Fuego. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur. 242 pp.
- Martínez Pastur, G., J.M. Cellini, M.V. Lencinas, P.L. Peri. 2008a. Stand growth model using volume increment/basal area ratios. *Journal of Forest Science* 54: 102-108.
- Martínez Pastur, G.J., J.M. Cellini, M.V. Lencinas, P.L. Peri. 2008b. Potencialidad de la cosecha y rendimiento industrial de bosques de *Nothofagus antarctica* en Tierra del Fuego (Argentina). 4º congreso Chileno de Ciencias Forestales Talca (Chile). P 48.
- McDill, M., R. Amateis. 1992. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science* 38(2): 409-429.
- Michaelis, L., M.L. Menten. 1913. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochem. Z.* 49: 333.

- Mittermeier, R.A., C.G. Mittermeier, T.M. Brooks, J.D. Pilgrim, W.R. Konstant, G.A.B. Da Fonseca, C. Kormos. 2003. Wilderness and biodiversity conservation proceedings of the National Academy of Science 100: 10309-10313.
- Monserud, R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science* 30: 943-965.
- Moore, D.M. 1983. *Flora de Tierra del Fuego*. Anthony Nelson, England. 338 pp.
- Muhairwe, C.K., V.M. LeMay, A. Kozak. 1994. Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.* 24: 252-259.
- Muukkonen, P. 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe, *European Journal of Forest Research* 126: 157-166.
- Mutarelli, E., E. Orfila, C. Alonso. 1968. Tabla local de cubicación para lenga (*Nothofagus pumilio*) en la zona del arroyo Llodconto, Cuenca del Lago Mascardi, Provincia de Río Negro. *Revista Forestal Argentina* 12(1): 22-31.
- Navarro, C., C. Donoso, V. Sandoval. 1999. Los renovales de Canelo. En: Donoso C, A. Lara (Cordinadores). *Silvicultura de los Bosques Nativos de Chile*. Santiago, Chile. Universitaria. Pp: 341-377.
- Newnham, R. 1988. A modification of the Ek-Payandeh nonlinear regression model for site index curves. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 115-120.
- Nigh, G. 1995. Variable growth models for lodgepole pine in the sub-boreal spruce biogeoclimatic zone. British Columbia. Research Report RR-02, 22 p.
- Nord-Larsen, T. 2006. Modelling the growth of european beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. Thesis submitted for the degree Philosophi/e Doctor. Royal Veterinary and Agricultural University. 246 pp.
- Norton, D.A. 1983. Modern New Zealand tree-ring chronologies I. *Nothofagus solandri*. *Tree-ring Bulletin* 43: 1-17.
- Nystrom, M.N. 1981. Reconstruction of pure, second-growth stands of western redcedar (*Thuja plicata* Donn) in western Washington: The development and silvicultural implications, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle. Pp: 97.
- Oliver, C.D., B.C. Larson. 1996 *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons, Inc. NY. 520 pp.
- Orfila, E. 1987. Tabla local de cubicación para *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl) Krasser, en la margen sur del lago General Vintter, provincia de Chubut – República Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata* 63: 62-68.
- Ormaechea, S.G., P.L. Peri, R. Molina, J.P. Mayo. 2009. Situación y manejo actual del sector ganadero en establecimientos con bosque de ñire (*Nothofagus antarctica*) en Patagonia Sur. I Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, Posadas, Misiones, Argentina. pp: 385-393.

- Ortega, A., G. Montero. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. ICONA, Madrid. *Ecología* 2: 155-184.
- Pauchard, A., E. Ugarte, M. Finckh, B Alaback. 2006. Subalpine *Nothofagus* and *Araucaria* forests across an environmental and disturbance gradient in South Central Chile: a floristic approach. [online] Consultado Jul. 2012. Disponible en <http://www2.udec.cl/~pauchard/conguillio.pdf>.
- Payandeh, B., Y. Wang. 1994. Modified site index equations for major Canadian timber species. *Forest Ecology and Management* 64: 97-101.
- Peri, P. 1995. Ecuaciones estándar de volumen bruto y neto para lenga (*Nothofagus pumilio*) del Valle del Río las Vueltas, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas*. Pp 194-204. San Martín de los Andes, 24-27 Octubre.
- Peri, P., G. Martínez Pastur. 1996. Crecimiento diamétrico de *Nothofagus pumilio* para dos condiciones de copa en un sitio de calidad media en Santa Cruz, Argentina. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 5(2): 201-212.
- Peri, P., G. Martínez Pastur, B. Diaz, F. Fucaraccio. 1997. Uso del índice de sitio para la construcción de ecuaciones estándar de volumen total de fuste para lenga (*Nothofagus pumilio*) en Patagonia Austral. *Actas II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano*. Pp 309-316. Posadas, 13-15 Agosto.
- Peri, P., G. Martínez Pastur. 1998. Crecimiento en cortinas cortaviento de *Populus nigra* cv 'Italica' en Patagonia Sur - Argentina. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 7(1-2): 73-83.
- Peri, P.L. 2005. Sistemas silvopastoriles en ñirantales. *IDIA XXI Forestal* 5(8): 255-259.
- Peri, P.L., M.V. Sturzenbaum, L. Monelos, E. Livraghi, R. Christiansen, A. Moretto, J.P. Mayo. 2005a. Productividad de sistemas silvopastoriles en bosques nativos de ñire (*Nothofagus antarctica*) de Patagonia Austral. *Actas III Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Comisión Nuevas Tendencias Forestales*. 10 pp. Corrientes, 6-9 Septiembre.
- Peri, P.L., G. Martínez Pastur, L. Monelos, E. Livraghi, M. Allogia, R. Christiansen, V. Sturzenbaum. 2005b. Sistemas silvopastoriles en bosques nativos de ñire: una estrategia para el desarrollo sustentable en la Patagonia Sur. En: *Dinámicas Mundiales, Integración Regional y Patrimonio en Espacios Periféricos* (R Zárata, L Artesi, Eds.). Río Gallegos (Argentina), Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Pp 251-259.
- Peri, P.L., L.H. Monelos, H.A. Bahamonde. 2006. Evaluación de la continuidad del estrato arbóreo en bosques nativos de *Nothofagus antarctica* bajo uso silvopastoril con

- ganado ovino en Patagonia Sur, Argentina. Congreso Latinoamericano Agroforestería. Habana, Cuba.
- Peri, P.L., H.A. Bahamonde, L.H. Monelos, G. Martínez Pastur. 2008. Producción de hojarasca en bosques primarios y bajo manejo silvopastoril de *Nothofagus antarctica* en la provincia de Santa Cruz, Argentina. EcoNothofagus 2008, Esquel, Argentina.
- Peri, P.L. 2009. Relevamiento de los bosques nativos de ñire (*Nothofagus antarctica*) de Tierra del Fuego (Argentina) como herramienta para el manejo sustentable. Ediciones INTA, 48 pp.
- Peri, P.L., N. Hansen, V. Rusch, L. Tejera, L. Monelos, M. Fertig, H. Bahamonde, M. Sarasola. 2009. Pautas de manejo de sistemas silvopastoriles en bosques nativos de *Nothofagus antarctica* (ñire) en Patagonia. I Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, Posadas, Misiones, Argentina. pp: 151-155.
- Peri, P.L., V. Gargaglione, G. Martínez Pastur, M.V. Lencinas. 2010. Carbon accumulation along a stand development sequence of *Nothofagus antarctica* forests across a gradient in site quality in Southern Patagonia. Forest Ecology and Management 260: 229-237.
- Peschel, W. 1938. Die mathematischen Methoden zur herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. Tharandter Forstlicher Jahrbuch 89: 169-247.
- Pimentel Gomes, F., C. García. 1993. A determinacao de equacoes volumétricas na Engenharia Florestal. Curso de Regresión aplicada a la Silvicultura y la Investigación agronómica. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales-UNLP. 40 pp.
- Premoli, A. 1991. Morfología y capacidad germinativa en poblaciones de *Nothofagus antarctica* (Forster) Oerst del noroeste andino patagónico. Bosque 12: 53-59.
- Premoli, A., R. Vidal. 2004. Variación en *Nothofagus antarctica* (Forster) Oerst. (Ñirre o Ñire). En: Donoso, C., R. Ipinza, A. Premoli, L. Gallo. Variación Intraespecifica en las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 173-188 pp.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, P. Real. 1997. Mensura Forestal. GTZ/IICA. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. San José (Costa Rica). 586 pp.
- Pulido, F., B. Díaz, G. Martínez Pastur. 2000. Incidencia del ramoneo del guanaco (*Lama guanicoe*) sobre la regeneración de lenga (*Nothofagus pumilio*) en bosques de Tierra del Fuego, Argentina. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 9(2): 381-394.
- Ramírez, C., M. Correa, H. Figueroa, J. San Martín. 1985. Variación del hábito y del hábitat de *Nothofagus antarctica* en el centro sur de Chile. Bosque 6(2): 55-73.

- Rayner, M. 1991. Site index and dominant height growth curves for re-growth karri (*Eucalyptus diversicolor* F Muell) in south-western Australia. *Forest Ecology and Management* 44: 261-283.
- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Reque, J., M. Sarasola, J. Gyenge, M. Fernández. 2007. Caracterización silvícola de ñirantales del norte de la Patagonia para la gestión forestal sostenible. *Bosque* 28(1): 33-45.
- Richards, J.F. 1959. A flexible growth functions for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10: 290-300.
- Salas, C., O. García. 2006. Modelling height development of mature *Nothofagus obliqua*. *Forest Ecology and Management* 229: 1-6.
- Sarasola, M., D. López, J. Gaitán, G. Sffredi. 2008. Productividad de sistemas forestales en bosques de ñire en la cuenca del río Foyel. *EcoNothofagus 2008*, Esquel, Argentina.
- SAyDSN. 2005. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Buenos Aires, 86 pp.
- Schmidt, H., A. Urzúa. 1982. Transformación y Manejo de los Bosques de lenga en Magallanes. Universidad de Chile. *Ciencias Agrícolas* n° 11. 62 pp.
- Schumacher, F., F. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber – tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47: 719-734.
- Shater, Z., S. de Miguel, B. Kraid, T. Pukkala, M. Palahí. 2011. A growth and yield model for even-aged *Pinus brutia* Ten. stands in Syria. *Annals of Forest Science* 68: 149-157.
- Skovsgaard, J.P., J.K. Vanclay. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-age stands. *Forestry* 81(1): 13-31.
- Soler Esteban, R. 2012. Regeneración natural de *Nothofagus antarctica* en bosques primarios, secundarios y bajo manejo silvopastoril. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 144 pp.
- Soler Esteban, R., G. Martínez Pastur, M.V. Lencinas, H.S. Ivancich, P.L. Peri. 2012. Regeneración natural de *Nothofagus antarctica* bajo distintos niveles de dosel y uso del bosque. II Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles. 9-11 de mayo de 2012. Santiago del Estero, Argentina.
- Splechtna, B. 2001. Height growth and site index models for pacific silver fir in southwestern British Columbia. *British Columbia Journal of Ecosystems and Management* 1: 1-14.
- Statgraphics Plus Ver. 5.1 Professional. 2001. STSC and Statistical Graphics Corporation. Bakersville Maryland. 13.

- Sturtevant, B.R., S.W. Seagle. 2004. Comparing estimates of forest site quality in old second-growth oak forests. *Forest Ecology and Management* 191: 311-328.
- Subedi, N., M. Sharma. 2011. Individual-tree diameter growth models for black spruce and jack pine plantations in northern Ontario. *For Ecol Manage* 261: 2140-2148.
- Teshome, T., J.A. Petty. 2000. Site index equation for *Cupressus lusitanica* stands in Munesa forest Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 126: 339-347.
- Tewari, V.P., V.S.K. Kumar. 2002. Development of top height model and site index curves for *Azadirachta indica* A. juss. *Forest Ecology and Management* 165: 67-73.
- Thrower, J.S. 1989. Site quality evaluation using site index. Silviculture Institute of British Columbia. 11 p.
- Thrower, J.S., J.W. Goudie. 1992. Development of height-age and site-index functions for even-aged interior Douglas-fir in British Columbia. British Columbia Ministry of Forests. Research Note N°109. 22 p.
- Trincado, G., A. Kiviste, K. Von Gadow. 2002. Preliminary site index models for native roble (*Nothofagus obliqua*) and raulí (*N. alpina*) in Chile. *New Zealand Journal of Forest Science* 32(3): 322-333.
- Upadhyay, A., T. Eid, P. Sankhayan. 2005. Construction of site index equations for even aged stands of *Tectona grandis* (teak) from permanent plot data in India. *Forest Ecology and Management* 212: 14-22.
- Uzoh, F.C.C., W.W. Oliver. 2008. Individual tree diameter model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model. *Forest Ecology and Management* 256: 438-445.
- Uriarte, C., H. Grosse. 1991. Los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*). Una orientación para su uso y manejo; recopilación bibliográfica. CORFO - INFOR. Informe técnico n°126. Concepción. 92 pp.
- Vanclay, J. 1991. Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. *Forest Ecology and Management* 42: 143-168.
- Vanclay, J. 1994. *Modeling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International, Wallingford - UK, 312 pp.
- Vanclay, J. 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. *Forest Science* 41 (1): 7-42.
- Vanclay, J., P.J. Sands. 2009. Calibrating the self-thinning. *Forest Ecology and Management* 259: 81-85.
- Vanclay, J., 2010. Robust relationships for simple plantation growth models based on sparse data. *Forest Ecology and Management* 259: 1050-1054.
- Veblen, T.T., D.H. Ashton, F.M. Schlegel, A.T. Veblen. 1977. Plant sucesión in a timberline depressed by vulcanism in south-central Chile. *Journal of Biogeography* 4: 275-294.

- Veblen, T.T. 1989. Tree regeneration responses to gaps along a transandean gradient. *Ecology* 70(3): 541-543.
- Veblen, T.T., R.S. Hill, J. Read. 1996. Ecology of Southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forest. In: *The Ecology and Biogeography of Nothofagus Forest*. Chapter 10: 293-353. Yale University Press, New Haven and London.
- Vukasovic, R., G. Martínez Pastur, J.M. Cellini. 2004. Plan de Manejo Forestal 'Los Cerros'. Consultora "Servicios Forestales". 125 pp.
- Wang, Y., B. Payandeh. 1994a. A bi-segmental curve fitting approach to improve the accuracy of site index equations. *Forest Ecology and Management* 67: 35-38.
- Wang, Y., B. Payandeh. 1994b. Application of the Kalman filter model in site index equation construction. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1415-1418.
- Wardle, J. The ecology of *Nothofagus solandri*, Parts 1-4. 1970. *New Zealand journal of botany* 8: 494-646.
- Waring, R.H., K.S. Milner, W.M. Jolly, L. Phillips, D. McWethy. 2006. Assessment of site index and forest growth capacity across the Pacific and Inland Northwest U.S.A. with MODIS satellite-derived vegetation index. *Forest Ecology and Management* 228: 285-291.
- Weiskittel, A.R., S.M. Garber, G.P. Johnson, D.A. Maguire, R.A. Monserud. 2007. Annualized diameter and height growth equations for Pacific Northwest plantation-grown Douglas-fir, western hemlock, and red alder. *Forest Ecology and Management* 250: 266-278.
- Wiant, H.V., G.B. Wood, T.G. Gregoire. 1992. Practical guide for estimating the volume of a standing sample tree using either importance or centroid sampling. *Forest Ecology and Management* 49: 333-339.
- Williams, M.S., T.G. Gregoire. 1993. Estimating weights when fitting linear regression models for tree volume. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1725-1731.
- Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa, K. Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology* 14: 107-129.
- Zeide, B. 1978. Standardization of growth curves. *Journal of Forestry* 76: 289-292.
- Zeide, B. 1987. Analysis of the 3/2 power law of self thinning. *Forest Science* 33(2): 517-537.
- Zeide, B. 1991. Quality as a characteristic of ecological models. *Ecological Modelling* 55: 161-174.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39(3): 594-616.
- Zeide, B. 2001. Thinning and growth. *Journal of Forestry* 99(1): 20-25

Zhao, D., B. Borders, M. Wilson. 2004. Individual tree diameter growth and mortality models for bottomland mixed-species hardwood stands in the lower Mississippi alluvial valley. *Forest Ecology and Management* 199: 307-322.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

CAPÍTULO I: Introducción general.....Pp 9.

Figura 1.1. Distribución de los bosques de *Nothofagus antarctica* y establecimientos rurales en las provincias de Santa Cruz y Tierra del Fuego.

Figura 1.2. Representación esquemática del cuerpo vegetativo aéreo de los tres tipos morfológicos de *Nothofagus antarctica*.

Figura 1.3. Dinámica natural en bosques de *Nothofagus antarctica*.

Figura 1.4. Dinámica natural y propuesta de manejo silvícola para bosques de *Nothofagus antarctica*.

CAPÍTULO II: Crecimiento en altura; Modelos forzados y no forzados para el cálculo de índice de sitio.....Pp 17

Tabla 2.1. Conjunto de datos para la modelación del crecimiento en altura de *N. antarctica*.

Tabla 2.2. Parámetros y estadísticos de los modelos de índice de sitio ajustados para *N. antarctica*.

Tabla 2.3. Valores de los coeficientes de Durbin-Watson para los modelos ajustados.

Tabla 2.4. Errores medios de los modelos de índice de sitio ajustados para *N. antarctica*.

Figura 2.1. Comparación de los errores globales absolutos de cada modelo ensayado por clase de sitio y por clase de edad utilizando una edad base de 50 años.

Figura 2.2. Errores medios porcentuales de la estimación (EME) por modelo de índice de sitio discriminado por clases de sitio y clases de edad, y errores medios porcentuales en valor absoluto ($|\hat{\epsilon}|$) por modelo de índice de sitio discriminado por clases de sitio y clases de edad para una edad base de 50 años.

Figura 2.3. Conjunto de datos y curvas de crecimiento acumulado en altura.

Figura 2.4. Curvas de incremento medio anual en altura (IMA).

CAPÍTULO III: Estructura forestal de los bosques de *Nothofagus antarctica* a lo largo de gradientes de edad y calidad de sitio.....Pp 33.

Figura 3.1. Distribución de los bosques de ñire y los sitios de muestreo en Patagonia Sur.

Tabla 3.1. Cantidad de parcelas muestreadas a lo largo de los gradientes de calidad de sitio y fase de desarrollo.

Tabla 3.2. Resultados de ANOVA para las variables biométricas relevadas, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Figura 3.2. Gráficos de las principales interacciones observadas en los ANOVAS factoriales para las variables altura dominante (HD), diámetro medio (DM), área basal (AB), densidad, volumen total con corteza (VTCC) e índice de densidad del rodal (%IDR), considerando la fase de desarrollo y la clase de sitio como factores principales de análisis.

Figura 3.3. Variación del porcentaje de área basal de individuos de diferente Sanidad, forma y aptitud maderera según calidad de sitio y fase de desarrollo.

Tabla 3.3. Resultados de ANOVA para el porcentaje de área basal de cada clase social, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Tabla 3.4. Resultados de ANOVA para el incremento promedio en diámetro, área basal y volumen, considerando la clase de sitio y la fase de desarrollo como factores principales de análisis.

Figura 3.4. Gráficos de las principales interacciones observadas en los ANOVAS factoriales para las variables de incremento promedio en diámetro (Inc DM), área basal (Inc AB) y volumen (Inc VTCC), considerando la fase de desarrollo y la clase de sitio como factores principales de análisis.

CAPÍTULO IV: Crecimiento diamétrico; familia de ecuaciones simples vs. ecuaciones integrales.....Pp. 49.

Tabla 4.1. Parámetros y estadísticos de los modelos de crecimiento en diámetro (*DAP*) para diferentes clases de sitio y clases sociales.

Figura 4.1. Dispersión de datos de la familia de ecuaciones individuales.

Figura 4.2. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio I.

Figura 4.3. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio II.

Figura 4.4. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio III.

Figura 4.5. Modelos de crecimiento en diámetro y dispersión de datos para diferentes clases sociales y clase de sitio IV y V.

Figura 4.6. Comparación de los modelos de crecimiento en diámetro (*DAP*) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio (S). Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

Figura 4.7. Comparación de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio (S) para diferentes clases sociales.

Figura 4.8. Comparación de los incrementos diamétricos de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio (S). Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

Figura 4.9. Comparación de los incrementos diamétricos de los modelos de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio (S) para diferentes clases sociales.

Figura 4.10. Comparación de los errores promedios y absolutos de la familia de modelos de crecimiento en diámetro (DAP) analizado en un gradiente de diámetros (DAP) para distintas clases de sitio.

Figura 4.11. Distribución de los errores globales promedios y absolutos de la familia de modelos de crecimiento en diámetro para distintas clases de sitio.

Tabla 4.2. Parámetros y estadísticos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP).

Figura 4.12. Dispersión de datos del modelo integral de crecimiento en diámetro.

Figura 4.13. Respuesta del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en función de las variables independientes (clase social y clases de sitio). Donde: D: dominantes; C: codominantes; I: Intermedios; S: Suprimidos.

Figura 4.14. Comparación de las curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: intermedios; SUP: suprimidos.

Figura 4.15. Comparación de curvas generadas por el modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio para diferentes clases sociales.

Figura 4.16. Comparación de los incrementos diamétricos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases sociales para diferentes clases de sitio. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: Intermedios; SUP: Suprimidos.

Figura 4.17. Comparación de los incrementos diamétricos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) en gradientes de clases de sitio para diferentes clases de copa.

Figura 4.18. Comparación de los errores promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) analizados en un gradiente de clases de sitio y clases sociales. Donde: DOM: dominantes; COD: codominantes; INT: intermedios; SUP: suprimidos.

Figura 4.19. Comparación de errores promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) analizados en un gradientes de frecuencias diamétricas para cada clase de sitio.

Figura 4.20. Comparación de los errores globales promedios y absolutos del modelo integral de crecimiento en diámetro (DAP) para distintas clases de sitio.

CAPÍTULO V: Desarrollo de modelos a escala individual y de rodal para predicción del volumen.....Pp 74.

Tabla 5.1. Características de la muestra y límites de uso de los modelos ajustados.

Tabla 5.2. Distribución de la muestra utilizada para la construcción de los modelos estándares distribuidos por frecuencias de diámetro y altura.

Tabla 5.3. Distribución de la muestra utilizada para la construcción de los modelos estándares distribuidos por frecuencias de diámetro y clase de sitio.

Figura 5.1. Dispersión de las unidades de muestreo de acuerdo al lugar de muestreo y su clase de sitio (S I a S V).

Tabla 5.4. Parámetros y estadísticos de los modelos locales desarrollados.

Figura 5.2. Distribución de residuos a lo largo del gradiente de volumen total con corteza (VTCC) predicho para cada lugar de muestreo.

Figura 5.3. Residuales promedios porcentuales en valor absoluto a lo largo del rango de calidades de sitio muestreadas.

Tabla 5.5. Parámetros y estadísticos de los modelos locales desarrollados con el coeficiente “b” fijo a un valor de 2,298.

Figura 5.4. Variación del parámetro “a” en relación al índice de sitio.

Figura 5.5. Sistema de ecuación integrada para *Nothofagus antarctica*, donde se grafican diferentes IS_{50} .

Tabla 5.6. Errores promedio de la ecuación local integrada según la calidad de sitio.

Tabla 5.7. Errores promedio de la ecuación local integrada según la calidad de sitio.

Tabla 5.8. Parámetros y estadísticos del modelo estándar tradicional.

Figura 5.6. Superficie de respuesta del modelo estándar tradicional y dispersión de residuos.

Tabla 5.9. Parámetros y estadísticos del modelo estándar no tradicional.

Figura 5.7. Superficie de respuesta del modelo estándar no tradicional y dispersión de residuos.

Tabla 5.10. Cantidad de parcelas según clase de sitio y fase de crecimiento.

Tabla 5.11. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo no tradicional.

Figura 5.8. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo no tradicional y dispersión de residuos.

Tabla 5.12. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC/AB de rodal basado en el modelo de Chapman-Richards.

Figura 5.9. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Chapman-Richards y dispersión de residuos.

Tabla 5.13. Parámetros y estadísticos del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Weibull.

Figura 5.10. Superficie de respuesta del modelo de relación VTCC / AB de rodal basado en el modelo de Weibull y dispersión de residuos.

Tabla 5.14. Error promedio y error promedio absoluto, y porcentuales entre paréntesis de los modelos de relación VTCC/AB para el gradiente de clases de sitio.

Tabla 5.15. Valores individuales de la relación de volumen total y área basal y valores medios de volumen a nivel de rodal.

Tabla 5.16. Distribución de la base de datos de la ecuación de uso práctico según los gradientes de AB y clase de sitio.

Tabla 5.17. Parámetros, estadísticos y curvas del modelo de volumen de uso práctico.

Figura 5.11. Superficie de respuesta del modelo de volumen de rodal de uso práctico y dispersión de residuos.

Tabla 5.18. Distribución de la muestra utilizada para la construcción del modelo de relación de Inc VTCC / AB según la fase de desarrollo y la clase de sitio del rodal.

Figura 5.12. Dispersión de datos de relación de incremento volumétrico y área basal para un gradiente de calidades de sitio.

Tabla 5.19. Parámetros, estadísticos y curvas del modelo de relación de Inc VTCC / AB.

Figura 5.13. Superficie de respuesta y Dispersión de residuos del modelo de relación de Inc VTCC / AB.

Figura 5.14. Errores promedios y absolutos a lo largo de gradientes de clases de sitio y de edades para el modelo de Relación Inc VTCC / AB.

Tabla 5.20. Valores individuales de la relación Inc VTCC / AB, y valores medios de incremento volumétrico a nivel de rodal.

CAPÍTULO VI: Modelo de producción para rodales de *Nothofagus antarctica* bajo dinámica natural.....Pp 111.

Figura 6.1. Pares de datos diámetro/densidad y modelo de densidad de rodal según Ivancich et al., 2009.

Figura 6.2. Modelo de índice de densidad relativa para rodales de *N. antarctica*.

Figura 6.3. Modelo de descuento de la altura dominante y distribución de residuos.

Figura 6.4. Distribución diamétrica del rodal inicial utilizado en las simulaciones discriminado por clases sociales. D: dominantes; C: codominantes; I: intermedios S: suprimidos.

Figura 6.5. Evolución de diámetro cuadrático medio (DCM) en las diferentes calidades de sitio.

Figura 6.6. Evolución del incremento anual del diámetro cuadrático medio del rodal en diferentes calidades de sitio.

Figura 6.7. Evolución de la altura dominante del rodal en las diferentes calidades de sitio.

Figura 6.8. Evolución del incremento anual de la altura dominante (Inc HD) del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

Figura 6.9. Evolución de la densidad de árboles del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

Figura 6.10. Evolución de la mortalidad de árboles del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

Figura 6.11. Evolución del área basal (AB) del rodal en diferentes clases de sitio (S).

Figura 6.12. Evolución del incremento anual del área basal (Inc AB) del rodal en diferentes clases de sitio (S).

Figura 6.13. Evolución del volumen total con corteza (VTCC) del rodal en diferentes calidades de sitio (S).

Figura 6.14. Incremento anual medio (IMA) e incremento anual periódico (IPA) del volumen total con corteza (VTCC) para diferentes calidades de sitio (S).

ANEXO

Salidas estadísticas de los análisis realizados

Tabla 1. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 30 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	7,347	0,46883	6,42623	8,26776
b	0,2697	0,03760	0,19585	0,34355
c	-0,0139	0,001654	-0,01715	-0,01065
d	0,8648	0,04374	0,77889	0,95071
e	0,1465	0,01953	0,10814	0,18486

Tabla 2: Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 30 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	38029,0	5	7605,79
Residuo	704,8	599	1,17661
Total	38733,7	604	
Total (Corr.)	6721,5	603	

Tabla 3. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 40 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	6,92844	0,58894	5,77123	8,08455
b	0,28535	0,04449	0,19856	0,37330
c	-0,01111	0,001202	-0,01353	-0,00881
d	0,79546	0,040582	0,71538	0,87479
e	0,20359	0,020236	0,16331	0,24280

Tabla 4: Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 40 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37719,5	5	7543,9
Residuo	510,2	595	0,857548
Total	38229,7	600	
Total (Corr.)	6645,8	599	

Tabla 5. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 50 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	7,04469	0,64831	5,77404	8,31535
b	0,28235	0,04677	0,19108	0,37441
c	-0,01125	0,00106	-0,01334	-0,00918
d	0,81259	0,04006	0,73407	0,89111
e	0,16418	0,02049	0,12356	0,20389

Tabla 6: Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Weibull para una edad base de 50 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37825,3	5	7565,07
Residuo	507,5	656	0,773614
Total	38332,8	661	
Total (Corr.)	8609,6	660	

Tabla 7. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 30 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	6,12110	0,20761	0,40775	-0,40774
b	0,38650	0,01975	0,03878	-0,03878
c	-0,02110	0,00144	0,00283	-0,00283
d	2,37490	0,29524	0,57984	-0,57984
e	-0,47080	0,05739	0,11271	-0,11271

Tabla 8. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 30 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	38040,7	5	7608,14
Residuo	693,0	599	1,15695
Total	38733,7	604	
Total (Corr.)	6721,5	603	

Tabla 9. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 40 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	5,06632	0,19954	4,67458	5,45835
b	0,46931	0,02086	0,42884	0,51077
c	-0,02055	0,00120	-0,02291	-0,01820
d	3,49721	0,44821	2,59332	4,35386
E	-0,61568	0,05731	-0,72517	-0,50007

Tabla 10. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 40 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37706,8	5	7541,36
Residuo	522,9	595	0,878884
Total	38229,7	600	
Total (Corr.)	6645,8	599	

Tabla 11. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 50 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	5,51982	0,21063	5,10888	5,93452
b	0,42223	0,01939	0,38454	0,46055
c	-0,01808	0,00098	-0,01996	-0,01612
d	3,62004	0,43674	2,73693	4,44893
e	-0,60694	0,05174	-0,70499	-0,50217

Tabla 12. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Richards para una edad base de 50 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37850,6	5	7570,11
Residuo	482,3	656	0,735181
Total	38332,8	661	
Total (Corr.)	8609,6	660	

Tabla 13. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 30 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,39654	1,89253	3,71678	-3,71679
b	0,84367	0,05229	0,10269	-0,10269
c	-0,34342	1,59402	3,13055	-3,13055
d	1,33670	0,10844	0,21296	-0,21296

Tabla 14. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 30 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	38025,9	4	9506,49
Residuo	707,8	600	1,17966
Total	38733,7	604	
Total (Corr,)	6721,5	603	

Tabla 15. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 40 años,

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,20892	0,78312	-1,3286	1,74745
b	0,86229	0,05010	0,76367	0,96046
c	-0,16145	0,98503	-2,09725	1,77187
d	1,24867	0,08321	1,08423	1,41109

Tabla 16. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 40 años,

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37740,4	4	9435,09
Residuo	489,4	596	0,821119
Total	38229,7	600	
Total (Corr,)	6645,8	599	

Tabla 17. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 50 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,29020	1,34297	-2,34188	2,92246
b	0,99361	0,05522	0,88539	1,10185
c	-0,16434	1,16714	-2,45236	2,12277
d	1,31003	0,08081	1,15466	1,47145

Tabla 18. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Goelz-Burk para una edad base de 50 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	37827,5	4	9456,88
Residuo	505,3	657	0,769099
Total	38332,8	661	
Total (Corr,)	8609,6	660	

Tabla 19. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 30 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	5,9613	0,19237	5,58426	6,33834
b	0,3899	0,0187937	0,35307	0,42674
c	-0,0243	0,00142045	-0,02708	-0,02152

Tabla 20. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 30 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	38011,4	3	12670,5
Residuo	722,4	601	1,20196
Total	38733,7	604	
Total (Corr,)	6721,5	603	

Tabla 21. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 40 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	4,77073	0,16724	4,44540	5,10231
b	0,49865	0,01916	0,46105	0,53632
c	-0,02253	0,00104	-0,02452	-0,02044

Tabla 22. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 40 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio
Modelo	37689,6	3	12563,2
Residuo	540,2	597	0,904806
Total	38229,7	600	
Total (Corr,)	6645,8	599	

Tabla 23. Estadísticos del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 50 años.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	5,32090	0,17931	4,97676	5,67965
b	0,44282	0,01742	0,40841	0,47668
c	-0,01970	0,00081	-0,02122	-0,01805

Tabla 24. Análisis de la varianza del modelo de índice de sitio de Newnham para una edad base de 50 años.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio
Modelo	37812,3	3	12604,1
Residuo	520,5	658	0,791053
Total	38332,8	661	
Total (Corr,)	8609,6	660	

Tabla 25. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social dominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	95,5132	25,56490	45,4111	145,624
b	0,00556	0,00211	0,00143	0,00969
c	1,19722	0,11671	0,96845	1,42596

Tabla 26. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social dominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	555572,0	3	185191
Residuo	29411,5	620	47,4379
Total	584983,0	623	
Total (Corr,)	176402,0	622	

Tabla 27. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social codominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	41,2611	1,53144	36,2537	44,2707
b	0,01775	0,00207	0,01369	0,02182
c	1,82988	0,18220	1,47196	2,18781

Tabla 28. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social codominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	284315,0	3	94771,7
Residuo	13719,0	524	26,1812
Total	298034,0	527	
Total (Corr,)	89073,1	526	

Tabla 29. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social intermedios.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	36,7741	2,17566	32,4929	41,052
b	0,02043	0,00362	0,01331	0,02754
c	2,15083	0,36281	1,43718	2,86449

Tabla 30. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social intermedios,

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	151554,0	3	50518
Residuo	12104,6	338	35,8123
Total	163659,0	341	
Total (Corr,)	48295,8	340	

Tabla 31. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social suprimidos,

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	31,8248	2,19339	27,482	36,1676
b	0,01545	0,00304	0,00943	0,02148
c	1,75292	0,25554	1,24697	2,25886

Tabla 32. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S I y una clase social suprimidos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	33303,9	3	11101,3
Residuo	791,4	120	6,59529
Total	34095,3	123	
Total (Corr,)	9611,5	122	

Tabla 33. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social dominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	223,938	102,107	21,1311	421,386
b	0,00179	0,00108	-0,00033	0,00391
c	1,05222	0,05856	0,94021	2,25886

Tabla 34. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social dominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	713680,0	3	237893,0
Residuo	35521,7	932	38,1135
Total	749202,0	935	
Total (Corr,)	313277,0	934	

Tabla 35. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social codominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	76,3061	8,05225	60,5197	92,084
b	0,00687	0,00116	0,00459	0,00945
c	1,37694	0,07639	1,22722	1,52667

Tabla 36. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social codominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	455560,0	3	151853,0
Residuo	29143,4	1003	29,0562
Total	484703,0	1006	
Total (Corr.)	313277,0	934	

Tabla 37. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social intermedios.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	54,3530	13,2479	28,3062	80,3851
b	0,00790	0,00319	0,00162	0,01418
c	1,32474	0,16824	0,99404	1,65544

Tabla 38. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social intermedios.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	112227,0	3	37408,9
Residuo	10891,1	426	25,566
Total	123118,0	429	
Total (Corr.)	50599,0	428	

Tabla 39. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social suprimidos.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	46,950	9,99464	27,2303	66,6879
b	0,00789	0,00349	0,00101	0,01477
c	1,35752	0,20928	0,94442	1,77062

Tabla 40. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S II y una clase social suprimidos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	27383,6	3	9127,9
Residuo	1949,0	171	11,3975
Total	29332,6	174	
Total (Corr,)	10766,1	173	

Tabla 41. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social dominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	73,221	9,28895	54,9459	91,358
b	0,00679	0,00156	0,00372	0,00986
c	1,22623	0,08594	1,05779	1,39467

Tabla 42. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social dominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	437254,0	3	145751,0
Residuo	27063,9	837	32,3344
Total	464318,0	840	
Total (Corr,)	192797,0	839	

Tabla 43. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social codominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	51,1152	2,19796	46,8071	55,4230
b	0,01310	0,00185432	0,00947	0,01673
c	1,7124	0,156687	1,40490	2,01910

Tabla 44. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social codominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	329746,0	3	109915,0
Residuo	21258,2	709	29,9834
Total	351004,0	712	
Total (Corr,)	141767,0	711	

Tabla 45. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social intermedios.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	54,0344	6,04701	42,1847	65,8886
b	0,00938	0,001999	0,00546	0,01330
c	1,52646	0,144839	1,24258	1,81034

Tabla 46. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social intermedios.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	240148,0	3	109915,0
Residuo	15503,8	613	29,9834
Total	255651,0	616	
Total (Corr,)	110929,0	615	

Tabla 47. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social suprimidos.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	100,781	68,449	-34,0325	235,114
b	0,00291393	0,00267095	-0,002346	0,00817
c	1,17023	0,150199	0,874412	1,46605

Tabla 48. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S III y una clase social suprimidos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	54234,5	3	18072,2
Residuo	3604,5	249	14,4761
Total	57839,0	252	
Total (Corr,)	29297,0	251	

Tabla 49. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social dominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	157,349	212,05	-259,23	573,917
b	0,00173	0,00324	-0,00462	0,00809
c	1,0325	0,22635	0,58783	1,47716

Tabla 50. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social dominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	445229,0	3	18072,2
Residuo	43891,4	249	14,4761
Total	57839,0	252	
Total (Corr,)	29297,0	251	

Tabla 51. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social codominante.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	387,324	1924,81	-3396,9	4171,55
b	0,00058	0,00319	-0,00568	0,00685
c	1,06592	0,209142	0,65474	1,4771

Tabla 52. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social codominante.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	156123,0	3	52040,9
Residuo	17157,1	393	436567
Total	173280,0	396	
Total (Corr,)	44493,0	395	

Tabla 53. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social intermedios.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	479,935	5188,51	-9728,6	10688,5
b	0,000299909	0,00381432	-0,00720	0,00781
c	0,929925	0,190072	0,55595	1,30392

Tabla 54. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social intermedios.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	115500,0	3	38499,8
Residuo	13390,5	315	42,5094
Total	128890,0	318	
Total (Corr,)	34548,5	317	

Tabla 55. Estadísticos del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social suprimidos.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	848,988	55348,2	-108188	109887
b	0,0001	0,00557599	-0,01088	0,01108
c	0,854	0,180895	0,49764	1,21037

Tabla 56. Análisis de la varianza del modelo de crecimiento diamétrico para una clase de sitio S IV-V y una clase social suprimidos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	47013,1	3	15671,0
Residuo	5894,7	237	24,8721
Total	52907,8	240	
Total (Corr,)	12377,2	239	

Tabla 57. Estadísticos del modelo integral de crecimiento diamétrico.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,58022	0,00639	-259,23	573,917
b	0,38395	0,00925	-0,00462	0,00809
c	83,1853			
d	0,15985	5359,0	-10504	10504,4
e	-0,00451	246741	-483604	483604
f	1,3429	4134,54	-8102,36	8104,78
g	-0,01114	9204,56	-18040,7	18040,6

Tabla 58. Análisis de la varianza del modelo integral de crecimiento diamétrico.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4134770,0	7	590681,0
Residuo	305373,0	8052	37,9251
Total	4440140,0	8059	
Total (Corr,)	1704270,0	8058	

Tabla 59. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Viamonte.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	7,7496 10 ⁻⁵	4,461 10 ⁻⁵	-1,8899 10 ⁻⁵	0,00017389
b	2,44783	2,07669	2,07669	2,81896

Tabla 60. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Viamonte.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,326707	2	0,163354
Residuo	0,005181	13	0,000399
Total	0,331889	15	
Total (Corr,)	0,106771	14	

Tabla 61. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad La Despedida.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001763	0,00010718	-4,2900 10 ⁻⁵	0,0003955
b	2,21451	0,17576	1,85504	2,573

Tabla 62. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad La Despedida.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,19051	2	0,595256
Residuo	0,05882	29	0,002028
Total	1,24933	31	
Total (Corr,)	0,43891	30	

Tabla 63. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Fuegoina.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0003044	0,0001996	-0,0001270	0,0007357
b	2,05108	0,183796	1,65401	2,4481

Tabla 64. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Fuegoina.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,82993	2	0,4149690
Residuo	0,02090	13	0,0016078
Total	0,85084	15	
Total (Corr,)	0,33724	14	

Tabla 65. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Inés.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	5,693710 ⁻⁵	8,210410 ⁻⁵	-0,00013721	0,0002511
b	2,53273	0,475761	1,40773	3,65772

Tabla 66. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Inés.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,06185	2	0,030925
Residuo	0,00118	7	0,00016
Total	0,06303	9	
Total (Corr,)	0,00591	8	

Tabla 67. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Inés1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,00013028	0,00006732	-1,41089 10 ⁻⁵	0,00027
b	2,43337	0,12758	2,15973	2,707

Tabla 68. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Inés1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	11,73320	2	5,866590
Residuo	0,176199	14	0,012586
Total	11,90940	16	
Total (Corr,)	6,43893	15	

Tabla 69. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Buenos Aires.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,00023325	$7,84554 \cdot 10^{-5}$	$6,37598 \cdot 10^{-5}$	0,000402
b	2,13739	0,08481	1,95416	2,32063

Tabla 70. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Buenos Aires.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	2,952220	2	1,47611000
Residuo	0,021014	13	0,00161646
Total	2,973230	15	
Total (Corr,)	1,437360	14	

Tabla 71. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad María Cristina.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002557	0,000184	-0,0001537	0,000665
b	2,10736	0,202094	1,65706	2,55765

Tabla 72. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad María Cristina.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,750429	2	0,37521400
Residuo	0,016098	10	0,00160976
Total	0,766526	12	
Total (Corr,)	0,246443	11	

Tabla 73. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Constancia.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001304	$7,38455 \cdot 10^{-5}$	$-2,91496 \cdot 10^{-5}$	0,000290
b	2,3994	0,15839	2,05722	2,74158

Tabla 74. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Constancia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,44168	2	0,72084
Residuo	0,02433	13	0,00187
Total	1,46601	15	
Total (Corr,)	0,62556	14	

Tabla 75. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad San Justo.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002966	0,000373488	-0,000510302	0,00110345
b	2,17677	0,35539	1,409	2,94455

Tabla 76. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad San Justo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,6469300	2	0,823464000
Residuo	0,1769910	13	0,013614700
Total	1,8239200	15	
Total (Corr,)	0,7761010	14	

Tabla 77. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Río Ewan.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,00008968	9,85154 10 ⁻⁵	-0,0001152	0,0002946
b	2,51768	0,290685	1,91317	3,1222

Tabla 78. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Río Ewan.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,05320	2	3,52660
Residuo	0,36992	21	0,01761
Total	7,42312	23	
Total (Corr,)	3,01439	22	

Tabla 79. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Río Ewan1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0008733	0,0002239	0,0003854	0,001361
b	1,81111	0,0651097	1,66925	1,95297

Tabla 80. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Río Ewan1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	3,17737	2	1,58868
Residuo	0,02167	12	0,00181
Total	3,19904	14	
Total (Corr,)	1,38917	13	

Tabla 81. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Rivadavia.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002705	0,0001115	3,28609 10 ⁻⁵	0,0005081
b	2,2197	0,10721	1,99118	2,44822

Tabla 82. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Rivadavia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,59733	2	3,29866
Residuo	0,07524	15	0,00502
Total	6,67257	17	
Total (Corr,)	2,76421	16	

Tabla 83. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Irigoyen.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002040	8,92004 10 ⁻⁵	1,1316 10 ⁻⁵	0,0003967
b	2,27698	0,10695	2,04592	2,50804

Tabla 84. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Irigoyen.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	11,79290	2	5,89646
Residuo	0,12930	13	0,00995
Total	11,92220	15	
Total (Corr,)	5,20078	14	

Tabla 85. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Rolito.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,000514548	0,00028707	-8,62983 10 ⁻⁵	0,001115
b	2,0195	0,145314	1,71536	2,32365

Tabla 86. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Rolito.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,39409	2	3,197040
Residuo	0,17533	19	0,009228
Total	6,56942	21	
Total (Corr,)	3,12068	20	

Tabla 87. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Los Cerros.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002557	0,0001704	-0,0001097	0,0006213
b	2,22485	0,16733	1,86595	2,58375

Tabla 88. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Los Cerros.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	10,88760	2	5,443780
Residuo	0,23003	14	0,016431
Total	11,11760	16	
Total (Corr,)	4,31358	15	

Tabla 89. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad C. Carreras.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	$6,9238 \cdot 10^{-5}$	0,00002172	$2,40704 \cdot 10^{-5}$	0,00011441
b	2,44664	0,11099	2,21582	2,67747

Tabla 90. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad C. Carreras.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,03437	2	0,017185
Residuo	0,00050	21	0,000024
Total	0,03487	23	
Total (Corr,)	0,01067	22	

Tabla 91. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad C. Carreras1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002214	$7,23182 \cdot 10^{-5}$	0,00007180	0,0003710
b	2,08314	0,101238	1,87372	2,29257

Tabla 92. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad C. Carreras1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,14338	2	0,071688
Residuo	0,00322	23	0,000140
Total	0,14659	25	
Total (Corr,)	0,08043	24	

Tabla 93. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad C, Carreras2,

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001002	$3,17375 \cdot 10^{-5}$	$3,29624 \cdot 10^{-5}$	0,00016752
b	2,47024	0,0836307	2,29295	2,64753

Tabla 94. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad C. Carreras2.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4,45384	2	2,22692
Residuo	0,01110	16	0,000694
Total	4,46494	18	
Total (Corr,)	2,24786	17	

Tabla 95. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	$1,286 \cdot 10^{-6}$	0,0001385	-0,0002173	0,0004091
b	3,6079	0,40812	1,35635	3,20281

Tabla 96. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,274891	2	0,13744500
Residuo	0,017074	9	0,00189714
Total	0,291965	11	
Total (Corr,)	0,109154	10	

Tabla 97. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,000501575	0,00049923	-0,0005972	0,0016004
b	1,93643	0,27213	1,33749	2,53538

Tabla 98. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,78293	2	0,89146
Residuo	0,05379	11	0,00489
Total	1,83671	13	
Total (Corr,)	0,40254	12	

Tabla 99. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike2.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0004846	0,0004443	-0,0004286	0,0013978
b	2,00485	0,22394	1,54453	2,46518

Tabla 100. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad Nibepo Aike2.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	17,79810	2	8,899060
Residuo	2,04222	26	0,078547
Total	19,84030	28	
Total (Corr,)	8,71131	27	

Tabla 101. Estadísticos del modelo local de volumen para la localidad San Pablo.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,000113553	4,66359E-05	1,96797E-05	0,00020743
b	2,43642	0,127987	2,17879	2,69404

Tabla 102. Análisis de la varianza del modelo local de volumen para la localidad San Pablo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,3884270	2	0,194214000
Residuo	0,0377096	46	0,000819774
Total	0,4261370	48	
Total (Corr,)	0,2334160	47	

Tabla 103. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Viamonte.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001245	4,2924510 ⁻⁶	0,0001153	0,0001337

Tabla 104. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Viamonte.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,32646	1	0,32646
Residuo	0,00543	14	0,00039
Total	0,33189	15	
Total (Corr,)	0,10677	14	

Tabla 105. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad La Despedida.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001327	0,0001072	-4,29001E-05	0,0003955

Tabla 106. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad La Despedida.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,19051	2	0,5952560
Residuo	0,05882	29	0,0020284
Total	1,24933	31	
Total (Corr,)	0,43891	30	

Tabla 107. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Fueguina.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001293	5,7975 10 ⁻⁶	0,0001169	0,0001417

Tabla 108. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Fueguina.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,82755	1	0,827545
Residuo	0,02329	14	0,001664
Total	0,85084	15	
Total (Corr,)	0,33724	14	

Tabla 109. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Inés.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001119	5,5808 10 ⁻⁶	9,9039 10 ⁻⁵	0,0001248

Tabla 110. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Inés.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,06181	1	0,06181
Residuo	0,00123	8	0,00015
Total	0,06303	9	
Total (Corr,)	0,00592	8	

Tabla 111. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Inés1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002176	7,13468 10 ⁻⁶	0,00020	0,00023

Tabla 112. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Inés1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	11,72030	1	11,72030
Residuo	0,189056	15	0,01260
Total	11,90940	16	
Total (Corr,)	6,438930	15	

Tabla 113. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Buenos Aires.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001258	3,13537 10 ⁻⁶	0,0001191	0,0001326

Tabla 114. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Buenos Aires.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	2,94763	1	2,94763
Residuo	0,02561	14	0,00183
Total	2,97323	15	
Total (Corr,)	1,43736	14	

Tabla 115. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad María Cristina.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001323	6,0701 10 ⁻⁶	0,0001189	0,0001457

Tabla 116. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad María Cristina.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,74918	1	0,74918
Residuo	0,01735	11	0,00158
Total	0,76653	12	
Total (Corr,)	0,24644	11	

Tabla 117. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Constanca.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001831	6,4375 10 ⁻⁶	0,0001693	0,0001969

Tabla 118. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Constanca.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,44108	1	1,44108
Residuo	0,02492	14	0,00178
Total	1,46601	15	
Total (Corr,)	0,62556	14	

Tabla 119. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad San Justo.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001951	1,71695 10 ⁻⁵	0,0001582	0,0002319

Tabla 120. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo con el coeficiente "b" fijo para la localidad San Justo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	1,64546	1	1,64546
Residuo	0,17846	14	0,01275
Total	1,82392	15	
Total (Corr,)	0,77610	14	

Tabla 121. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Río Ewan.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001964	9,6992 10 ⁻⁶	0,0001762	0,0002164

Tabla 122. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Río Ewan.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,04501	1	7,04501
Residuo	0,37811	22	0,01719
Total	7,42312	23	
Total (Corr,)	3,01439	22	

Tabla 123. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Río Ewan1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001349	6,674910 ⁻⁶	0,0001205	0,0001493

Tabla 124. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Río Ewan1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	3,10033	1	3,10033
Residuo	0,09870	13	0,00759
Total	3,19904	14	
Total (Corr,)	1,38917	13	

Tabla 125. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Rivadavia.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0002012	5,4595 10 ⁻⁶	0,0001896	0,0002128

Tabla 126. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Rivadavia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,5949	1	6,59490
Residuo	0,07767	16	0,00485
Total	6,67257	17	
Total (Corr,)	2,76421	16	

Tabla 127. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Irigoyen.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001865	5,2277 10 ⁻⁶	0,0001753	0,0001977

Tabla 128. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Irigoyen.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	11,7925	1	11,7925
Residuo	0,12969	14	0,00926
Total	11,9222	15	
Total (Corr,)	5,20078	14	

Tabla 129. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Rolito.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001821	7,2599 10 ⁻⁶	0,0001669	0,0001972

Tabla 130. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Rolito.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,36707	1	6,36707
Residuo	0,20235	20	0,01012
Total	6,56942	21	
Total (Corr,)	3,12068	20	

Tabla 131. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Los Cerros.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001922	7,259 10 ⁻⁶	0,0001767	0,0002077

Tabla 132. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad Los Cerros.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	10,8847	1	10,8847
Residuo	0,23285	15	0,01552
Total	11,1176	16	
Total (Corr,)	4,31358	15	

Tabla 133. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad C. Carreras.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001031	$2,7575 \cdot 10^{-6}$	$9,7362 \cdot 10^{-5}$	0,0001088

Tabla 134. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad C. Carreras.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,03433	1	0,03433
Residuo	0,00054	22	0,0000245
Total	0,03487	23	
Total (Corr,)	0,01067	22	

Tabla 135. Estadísticos del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad C. Carreras1.

Parámetro	Estimado	Asintótica Error estándar	Asintótica 95% Intervalos de confianza	
			Inferior	Superior
a	0,0001126	$3,7220 \cdot 10^{-6}$	0,0001049	0,0001202

Tabla 136. Análisis de la varianza del modelo local de volumen con el coeficiente "b" fijo para la localidad C. Carreras1.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	0,14284	1	0,14284
Residuo	0,00375	24	0,00016
Total	0,14659	25	
Total (Corr,)	0,08043	24	