El presente libro corresponde a la segunda publicación de la serie Estudios en Silvicultura de Bosques Nativos, la que se inició el año 2013. Con esta serie de libros se pretende difundir, de manera periódica, avances en estudios sobre silvicultura y materias relacionadas (ecología forestal aplicada y restauración), que se han llevado a cabo especialmente en Chile, pero también en otras regiones del mundo en los que existen bosques templados. El libro se dividió en tres grandes secciones. La primera, sobre Ecología Forestal, aborda temas sobre ecología de la regeneración, ecología de claros de bosques y el uso de la fitosociología como herramienta metodológica para el diagnóstico florístico y ecológico de los bosques. La segunda sección del libro trata sobre la Silvicultura y el Manejo, e incluye cinco trabajos que versan sobre el crecimiento, la silvicultura y el manejo de los bosques secundarios en Chile, además de la silvicultura de bosques de Ciprés de la Cordillera en Argentina y sobre el potencial del silvopastoreo. Finalmente, la sección de Degradación y Restauración incluye cinco trabajos, dos de ellos sobre degradación de bosques (en Chile y Argentina) y los otros tres sobre restauración de bosques, uno en Chiloé y los otros dos en bosques de la costa oeste de los Estados Unidos. En conjunto esta gran diversidad de trabajos permite a los lectores recorrer múltiples bosques templados de diversas regiones de América. Además este libro provee diferentes perspectivas de una gran diversidad de silvicultores y ecólogos forestales con respecto a cómo manejar bosques y ecosistemas forestales de acuerdo especialmente a sus condiciones de desarrollo y de conservación en función de mantener, incrementar o recuperar su resiliencia y productividad.

Esperamos que esta publicación sea de interés, y en especial sea útil para los lectores, silvicultores y tomadores de decisiones y, que contribuya de esa forma a un mejor manejo y restauración de nuestros bosques nativos. Creemos que este es un aporte más en apoyo a la conservación o recuperación de los valores y las riquezas asociados a los bosques templados. Los nuevos conocimientos teóricos y prácticos para el manejo y restauración de los bosques, varios de ellos expresados en este libro, debiesen fluir hacia quienes en definitiva intervienen los bosques. Si bien la tarea del manejo forestal sostenible es compleja, es fundamental la generación de mayores y mejores puentes de comunicación entre investigadores, instituciones vinculadas a la conservación y manejo de ecosistemas forestales, propietarios de bosques nativos y la sociedad en general. Este libro representa una contribución a esa tarea, los resultados de investigaciones dirigidas a la aplicación de prácticas para el buen manejo de nuestros bosques nativos.

Auspiciadores

Oregon State University College of Forestry
Universidad Austral de Chile
Conocimiento y Naturaleza
cfcn
Universidad de Aysén
Universidad Católica de Temuco
INFOR
Universidad de la Frontera
Conaf

The Chile Initiative, OSU College of Forestry, Corvallis, Oregon, USA
ISBN 978-0-692-09238-5

Donoso, Promis y Soto

Silvicultura en bosques nativos

Silvicultura en bosques nativos

Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos

Silviculture in native forests
Experiences in silviculture and restoration in Chile, Argentina and western USA

Pablo J. Donoso, Álvaro Promis y Daniel P. Soto
Editores

SILVA COVER_March 15.indd 1
3/15/2018 5:08:27 PM

Silvicultura en bosques nativos
Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos

Copyright © Pablo J. Donoso, Álvaro Promis and Daniel P. Soto 2018

ISBN 978-0-692-09238-5

Produced by the Chile Inititiatve, OSU College of Forestry, Corvallis, Oregon USA; printed by Imprenta America, Valdivia, Chile.

The opinions expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily represent those of Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA; Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile; or Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Las opiniones expresadas en este libro son propiedad de los autores y no representan necesariamente aquellas de la Oregon State University, Corvallis, Oregón, EE. UU.; Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile; o Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Disclaimer

Mention of trade names and products does not constitute endorsement, recommendation for use, or promotion of the products by the authors or the organizations with which they are affiliated.

La mención de nombres comerciales y productos no constituye endoso, recomendación de uso o promoción de los productos por los autores o las organizaciones con las que están afiliados.

Cover photo: © Pablo J. Donoso 2018. All Rights Reserved.
Fotografía de portada: © Pablo J. Donoso 2018. Todos los derechos reservados.

Design and layout by Caryn M. Davis, Cascadia Editing, Philomath, Oregon USA. Email: cascadia.editing@gmail.com.
Diseño y maquetación del libro por Caryn M. Davis, Cascadia Editing.

Silvicultura en bosques nativos

Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos

Silviculture in native forests
Experiences in silviculture and restoration in Chile, Argentina and western USA

Estudios en Silvicultura de bosques nativos volumen 2

Pablo J. Donoso, Álvaro Promis y Daniel P. Soto
Editores

The Chile Initiative, OSU College of Forestry

Auspiciadores

4 Crecimiento de bosques secundarios y adultos de *Nothofagus* en el centro-sur de Chile

Growth of secondary and old-growth Nothofagus forests in south-central Chile

Christian Salas-Eljatib*, Andrés Fuentes-Ramírez, Pablo J. Donoso, Camilo Matus, Daniel P. Soto

Resumen

El crecimiento de los bosques es clave para entender su dinámica y para realizar un manejo sustentable en éstos. Si bien el crecimiento de un árbol se puede medir de forma relativamente fácil, el crecimiento de un bosque sólo se puede determinar al evaluar variables de estado (e.g. densidad, volumen) en unidades de muestreo permanentes en el tiempo. Debido al alto costo de mantenimiento de estudios a largo plazo, es difícil conocer antecedentes de crecimiento (p. ej. incremento, mortalidad y reclutamiento) de bosques naturales. Aunque existe una importante cantidad de estudios sobre la ecología y dinámica de bosques de segundo crecimiento (renovales) de *Nothofagus*, un seguimiento temporal de las variables de estado es sólo posible de encontrar en un reducido número de unidades de muestreo permanente en el centro-sur de Chile (37º 30′ - 41º 30′ S). Este problema se ve aún más acentuado en bosques adultos de *Nothofagus*, donde la extrema escasez de este tipo de bosque, se suma a la poca investigación realizada en ellos. Dado lo anterior, este trabajo tiene por objetivo describir el crecimiento de bosques secundarios y adultos de *Nothofagus* en el centro-sur de Chile. Este trabajo se organiza en: (a) contextualizar una terminología apropiada sobre crecimiento de bosques, y (b) caracterizar ambos tipos de bosques en base a el más amplio grupo de unidades de muestreo permanente (74 en renovales y siete en bosques adultos) con evaluaciones temporales en términos de variables de estado, crecimiento, estructura diamétrica temporal, y patrones de distribución espacial. Este trabajo ofrece información cuantitativa para entender de mejor forma la dinámica de los bosques, como también para ayudar en una apropiada planificación de intervenciones silviculturales.

Palabras clave: mortalidad, reclutamiento, unidades de muestreo permanente, dinámica de bosques, ecología forestal.

Abstract

Growth is key for understanding forest stand dynamics and is also important for sustainable forest management. Although individual tree growth is relatively easy to measure, forest growth can only be known by measuring stand variables (e.g., density, volume) on permanent sample plots over time. Due to the high cost of maintaining long-term research programs, however, it is difficult to acquire growth information (increment, mortality, and recruitment) of natural forests. Although there are a significant number of silvicultural studies on secondary forests of *Nothofagus*, a temporal study of these forests is only possible on a relatively small number of permanent sample plots in south-central Chile (37º 30′ - 41º 30′ S). This problem is even worse for old-growth *Nothofagus* forests, both because they are scarce in the landscape and important research is lacking. Given the above, we aimed to describe growth for secondary- and old-growth *Nothofagus* forests in south-central Chile. To accomplish this, we divided our study in order to (a) provide a suitable terminology for forest growth, as well as (b) characterize both types of forests by using the largest available data set of remeasured permanent sample plots (74 in secondary and seven in old-growth forests) in terms of state variables, growth, temporal diameter distribution, and spatial patterns. We offer quantitative information for improving our understanding of forest dynamics, as well as for planning suitable silvicultural treatments.

Key words: mortality, recruitment, permanent sampling plots, forest dynamics, forest ecology.

Introducción

El crecimiento de un árbol está determinado por factores internos y por su ambiente externo (Odin 1972). Aunque el crecimiento puede ser medido en diferentes niveles de estructura de un organismo, puede ser descrito tanto a nivel individual (i. e.

* Autor de correspondencia: christian.salas@ufrontera.cl.

árbol) como grupal (i. e. bosque). El crecimiento es el producto de diversos factores abióticos y bióticos interactuando en un árbol y en un bosque a través del tiempo. El conocimiento de cómo estos factores afectan al crecimiento de un árbol y un bosque es importante para entender cómo la estructura y composición de un ecosistema forestal cambian en el tiempo. Entonces, comprender el crecimiento de los bosques es clave para inferir la dinámica de los bosques y para evaluar alternativas silviculturales en el desarrollo de un bosque. Esto es porque las tasas de crecimiento pueden ayudar a evaluar la oportunidad, intensidad y periodicidad de intervenciones silvícolas a realizar en un bosque. Por lo tanto, la información sobre crecimiento es vital para la toma de decisiones de manejo forestal y para el entendimiento de los ecosistemas forestales. Los bosques dominados por *Nothofagus obliqua* (roble), *Nothofagus alpina* (raulí), y *Nothofagus dombeyi* (coigue) son especialmente importantes en el centro-sur de Chile (37 30′ - 41 30′ S), y han sido clasificados como pertenecientes al tipo forestal roble-raulí-coigue (Donoso 1995). La gran mayoría de estos bosques son de tipo secundario o renovales, los que cubren 907.329 ha en dicha zona geográfica, representando 84,1 % de la superficie del mencionado tipo forestal (CONAF 2013). Los antecedentes sobre su dinámica, composición y estructura son descritos en Donoso (1995). Este tipo de bosques poseen un alto potencial de manejo silvícola debido a sus altas tasas de crecimiento, estructura coetánea y buen acceso. Aunque existen evidencias empíricas sobre su buena respuesta al manejo silvícola (Puente 1979, Grosse 1987, Donoso *et al*. 1993b), el manejo de estos bosques no ha sido muy extenso, ni alcanza niveles operativos (Salas *et al*. 2016). Por otra parte, los bosques adultos de este tipo forestal, clasificados como remanentes originales por Donoso (1995) o como bosques latifoliados principalmente siempreverdes de tierras bajas en sitios de drenaje adecuado por Veblen y Schlegel (1982), tan sólo cubrirían 25.188 ha (superficie derivada a partir de CONAF 2013, considerando la categoría de bosques densos y con una altura mayor a 20 m) en el centro-sur de Chile, representando tan sólo 2,3 % de la superficie del tipo forestal roble-raulí-coigue. Estos bosques son bastante escasos y están distribuidos en forma muy dispersa en el territorio (Salas *et al*. 2006). Aunque los bosques adultos han sido considerados importantes para iniciativas de conservación, la investigación en ellos es aún deficiente. En la figura 4.1 se muestran imágenes de algunos renovales y bosques adultos de *Nothofagus*.

El presente trabajo tiene por objetivo describir el crecimiento de bosques secundarios y adultos de *Nothofagus* en el centro-sur de Chile. Para ello, el trabajo se centra en caracterizar ambos tipos de bosques en términos de: (a) variables de estado, (b) crecimiento (i. e. incremento, mortalidad y reclutamiento), (c) estructura diamétrica temporal y (d) patrones de distribución espacio-temporal de árboles.

Crecimiento y su conceptualización. El término crecimiento es de esos que cualquiera entiende, pero que es muy difícil de definir (Baker 1950). Aunque se pueden rastrear definiciones de crecimiento tan antiguas como de la época de Aristóteles (Seger y Harlow 1987), uno de los primeros obstáculos en entender el crecimiento de un árbol es la falta de precisión en la definición de lo que se entiende por este proceso (Agren 1981). El crecimiento de un árbol está determinado por división, extensión y diferenciación celular (Odin 1972), implicando un incremento en tamaño y la formación de nuevos tejidos. El crecimiento puede ocurrir aun en órganos viejos, particularmente hojas (Baker 1950). En el presente trabajo, se refiere al crecimiento de variables tales como altura y diámetro como el incremento irreversible en el largo de meristemas apicales y en el diámetro fustal, respectivamente (Odin 1972), o en términos fisiológicos, la incorporación de carbono en material estructural (Agren 1981). No obstante, en el presente estudio se adopta a Ek y Monserud (1975), en el sentido que el nivel de abstracción enfatiza las características externas medibles de un árbol (o variables).

En las ciencias forestales, existe un vago uso de los términos crecimiento, rendimiento, incremento y tasa de crecimiento. En la modelación del crecimiento, estos términos pueden ser más claramente

Figura 4.1 Imágenes representativas de bosques secundarios y adultos del tipo forestal roble-raulí-coigue en la región de La Araucanía, Chile. Renovales de (a) raulí en Curacautín y (b) coigue en Malalcahuello. (c) Bosque adulto de roble-olivillo-ulmo en Rucamanque.

definidos, sin embargo, no lo es tanto en aplicaciones prácticas. En el presente trabajo, se definirán los términos anteriores, siguiendo las explicaciones dadas en Yang *et al.* (1978) y Bruce (1981), y la consistencia matemática necesaria con los conceptos de cálculo diferencial (Franklin 1944). Primero se aclara qué se referirá a la variable de estado y, siendo ésta la variable de interés para el investigador, y que puede medirse a nivel de árbol o bosque, o a cualquier otro nivel de detalle deseado. Crecimiento es la variable de estado en un determinado tiempo t, es decir, cuando se conoce el tiempo en el cual la variable de estado fue medida, ahí se habla de su crecimiento en ese momento t, simbolizado por y_t. El término rendimiento en ciencias forestales se ha tendido a emplear para casi exclusivamente representar el crecimiento de la variable volumen. Debido a que rendimiento es principalmente relacionado con productividad en volumen, o a aspectos económicos de un cultivo, es que no se recomienda su uso y no será empleado en el presente trabajo. Incremento es la variación (i. e. aumento o disminución) de una variable de estado en un cierto periodo de tiempo. Para medir el incremento, es necesario conocer

primero el crecimiento de una variable en al menos dos tiempos o momentos, los cuales se simbolizan por t_0, el tiempo inicial, y t_1 el tiempo final del periodo. Entonces, se mide el crecimiento de la variable al inicio y al final del periodo, y se representa como y_0 e y_1, respectivamente (figura 4.2a). El largo del periodo de análisis es $t_1 - t_0$ y se representa por Δt, así como el incremento en ese periodo es $y_1 - y_0$ y se representa por Δy (figura 4.2b). La tasa de crecimiento se refiere a un indicador de cuán rápido ha sido el crecimiento, y se puede calcular de diferentes maneras. Por ejemplo, la tasa de cambio promedio para el periodo se calcula como la razón entre el incremento y el periodo transcurrido ($\Delta y/\Delta t$). Esta tasa de cambio promedio recibe tradicionalmente el nombre de incremento periódico anual (*IPA*), si el tiempo t es medido en años, y se expresa mediante

$$IPA_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_1 - y_0}{t_1 - t_0} \qquad [1]$$

donde: IPA_y es el incremento periódico anual para la variable de estado y; y_1 es el valor de la variable al tiempo t_1 o final del periodo; y_0 es el valor de la variable al tiempo t_0 o inicio del periodo. Es importante destacar que esta tasa de crecimiento [1] es la pendiente de una recta trazada entre los dos momentos en que se observa el crecimiento (figura 4.2c), y es por lo tanto una tasa de crecimiento constante dentro del periodo. Note además que en [1], si $\Delta t = 1$, el *IPA*, se transforma en el incremento corriente anual o *ICA*, ya que el periodo es igual a un año.

Es importante entender que los incrementos (*IPA* o *ICA*, i. e. periódicos o corrientes) son posibles de calcular cuando se tiene información de la variable de estado en al menos dos momentos, y no es necesario conocer la edad del bosque o árbol para su cálculo. Por otra parte, hay un tercer tipo de incremento que sí requiere conocer la edad, el incremento medio anual o *IMA* que se define como

$$IMA_y = \frac{y_t}{t} \qquad [2]$$

donde: IMA_y es el incremento medio anual para la variable de estado y; y_t es el valor de la variable al tiempo t; y t representa el tiempo necesario para al alcanzar el valor de la variable de estado.

Medición del crecimiento de bosques. Esta tarea se puede realizar mediante diferentes alternativas que se resumen a continuación, pero todas tienen en común permitir la obtención de información de variables de interés en el tiempo. Aunque existen algunas referencias básicas sobre la medición del crecimiento de bosques (Beetson *et al*. 1992, von Gadow

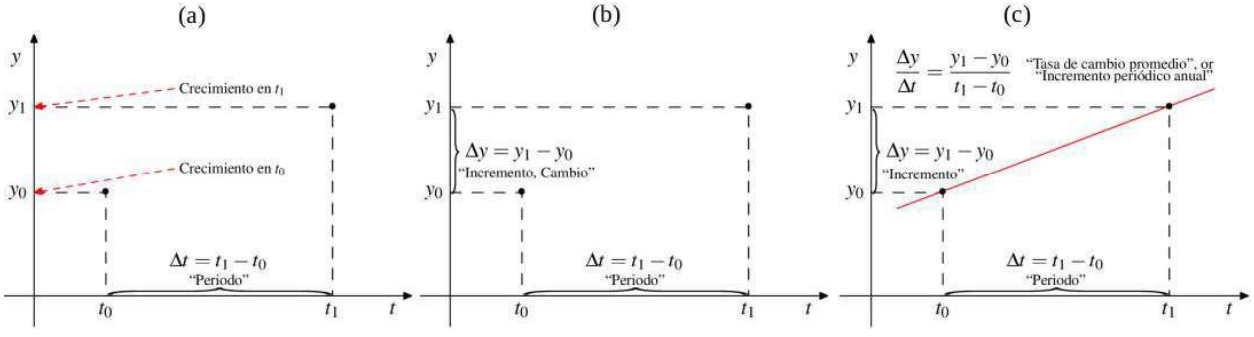

Figura 4.2 Explicación gráfica sobre crecimientos. (a) La variable al tiempo inicial t_0 es el crecimiento en ese momento (y_0), y de la misma forma se tiene el crecimiento de y en un tiempo posterior t_1, representado por y_1. (b) El periodo de tiempo ($t_1 - t_0$) entre estas dos mediciones se representa por Δt, mientras que la variación en la variable, $y_1 - y_0$, en el periodo se representa por Δy, denominándose incremento o cambio. (c) Una forma de calcular la tasa de crecimiento de una variable, es obtener la razón entre el incremento Δy y el largo del periodo Δt, lo que corresponde a la pendiente de una recta entre estos dos puntos.

y Hui 1999), los autores del presente trabajo creen que, dada su complejidad, sobre todo en bosques naturales, los diferentes niveles de detalle posibles de establecer, sus fuentes de variación, y por su relevancia, es importante aclarar y diferenciar entre las diferentes alternativas de medición del crecimiento de bosques.

(a) Tarugos de incremento. Los árboles que crecen en climas templados producen una capa distintiva de madera cada año. Una capa es formada cada año entre la corteza y la madera previamente formada (Campbell 1885). Al extraer un tarugo de madera, desde el cambium hacia la médula del árbol, es posible medir la edad al contar los anillos anuales de crecimiento, así como los incrementos radiales, al medir la distancia entre los anillos. La extracción de un tarugo de incremento es una técnica no destructiva, ya que no daña al árbol (van Mantgem y Stephenson 2004). Además, esta técnica permite medir una serie de otras variables, como composición química de tejidos y densidad de la madera (Taras y Wadlgren 1963), y constituye la base de la dendrocronología, la disciplina que estudia los anillos de los árboles para fechar eventos (McGinnies 1963, Monserud 1986).

(b) Análisis fustal. En esta técnica se obtienen varios discos (o rodelas) de madera a lo largo del fuste de un árbol, siendo por lo tanto una metodología destructiva, a diferencia de la anterior. Además de conocer la altura de cada sección, se mide el número total de anillos en cada disco, y a veces se mide también el incremento radial en cada uno de ellos (Spurr 1952). Mediante esta técnica es posible reconstruir no tan sólo el crecimiento diametral, sino que además, el crecimiento en altura de un árbol. Así también, permite la reconstrucción de la variación en la forma del árbol en el tiempo, y así por lo tanto su crecimiento en volumen, constituyéndose en la técnica de medición que ofrece la mayor cantidad de información sobre el crecimiento de un árbol (van Laar y Akca 2007).

(c) Unidades de muestreo permanente. Las técnicas anteriores tan sólo permiten la medición del crecimiento a nivel individual, pero no la medición del crecimiento a nivel agregado o bosque. Para esto, es necesario contar con información obtenida desde unidades de muestreo permanente (UMP) o parcelas de muestreo permanente, en donde todos los individuos han sido marcados para su seguimiento en el tiempo, y han sido medidos en al menos dos ocasiones. Sólo mediante información medida en UMP, es posible medir el crecimiento a nivel de bosque. No obstante, existen algunas metodologías promovidas en algunas iniciativas de caracterización de bosques, que basada en el establecimiento de unidades de muestreo temporal (no permanente) y combinado con la extracción de tarugos en algunos árboles en cada unidad, estiman el crecimiento a nivel de bosque. Por ejemplo, empleando el denominado muestreo del sexto-árbol (p. ej. Zohrer 1987, Akca y Krammer 1980), e información de tarugos de incremento para esos seis árboles. Sin embargo, es aún más importante señalar que este tipo de metodologías son incorrectas en dos aspectos: el muestreo del sexto-árbol es un tipo de muestreo sesgado estadísticamente y no se puede conocer la mortalidad mediante esta técnica. La mortalidad es un componente clave en la dinámica y ecología de los bosques (Franklin *et al*. 1987), y su medición es sólo posible de evaluar mediante la remedición de unidades de muestreo permanente. Esto último es vital de dimensionar para comprender cabalmente que las UMPs son cruciales para el monitoreo efectivo de los ecosistemas forestales.

Estudios de crecimiento en bosques de roble-raulí-coigue. En el estudio del crecimiento de bosques existen dos alternativas desde donde poder contar con información necesaria. Estas son unidades permanente provenientes de (a) un sistema nacional de inventario continuo y (b) de experimentos permanentes. A continuación, se comentan sobre cada uno de ellos en relación a los bosques de roble-raulí-coigue.

(a) Sistema de inventario continuo. Chile, aunque cuenta con sistemas de inventarios forestales, no posee información al nivel necesario para un correcto estudio científico del crecimiento de bosques. El

sistema de inventario continuo de Chile, llevado a cabo por el Instituto Forestal (INFOR), es sólo un esfuerzo relativamente reciente, concluyendo recientemente un primer ciclo de mediciones en todo el territorio nacional (mayores antecedentes se pueden encontrar en http://mapaforestal.infor.cl, y en http://www.simef.cl/). No obstante, las características de las mediciones y diseño realizadas por el INFOR tienen un espíritu a nivel de inventario nacional (comunicación personal con Carlos Bahamondez, encargado de inventario del INFOR). Esto imposibilita fehacientemente el uso de esta información con un enfoque más científico, que es el que se puede obtener mediante la remedición de las mismas UMPs en el tiempo. Por otra parte, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) ha estado también llevando a cabo un sistema de inventario forestal, pero tan sólo recientemente ha terminado de establecer una red de UMPs, no existiendo remediciones a la fecha (comunicación personal con Verónica Oyarzún, Jefa Departamento de Monitoreo de Ecosistemas Forestales de CONAF). Esta iniciativa de CONAF se ha basado en esfuerzos realizados primeramente en el marco del Catastro de la Vegetación Nativa y recientemente con nuevos fondos relacionados al cambio climático financiados por el Gobierno de Suiza. Paradójicamente, y a pesar de que las instituciones que coordinan esfuerzos de inventarios nacionales (INFOR y CONAF), son divisiones oficiales del Estado de Chile, los datos derivados de esos inventarios no están libremente disponibles para los usuarios. De todas maneras, INFOR en los últimos cinco años ha estado trabajando en políticas y alternativas para entregar esa información. Sin embargo, y en resumen, no existen datos públicos disponibles de un sistema de UMPs en bosques naturales para Chile. Mayores antecedentes sobre los esfuerzos históricos de inventarios forestales permanentes fueron destacados por Salas y Real (2013).

Chile necesita de un sistema organizado de estudios permanentes de largo plazo en bosques naturales. La necesidad, y así como también las dificultades de este tipo de estudios, han sido destacados desde hace mucho tiempo en Chile (p. ej. Armesto *et al*. 1999, Donoso 2006, Franklin y Swanson 2010, Lara *et al*. 2010). No obstante, mayores cambios no exhibe el país en la última década en esta materia, salvo por la iniciativa del Instituto Milenio de Ecología y Biodiversidad de Chile, que ha asociado sus sitios de estudio con la red "International Long Term Socio-Ecological Research" (ILTSER), y que permite un estudio de largo plazo de primer nivel (mayores antecedentes se pueden encontrar en http://www.ltser-chile.cl/). Es importante destacar que este tipo de esfuerzos científicos debieran ser un deber a nivel país y no tan sólo recaer en esfuerzos de algunos científicos mediante el uso de fondos provenientes de proyectos de investigación, que por lo demás, casi siempre tienen un horizonte de corto plazo (2–4 años en general).

(b) Experimentos permanentes. Existen sólo antecedentes generales sobre el crecimiento de bosques de roble-raulí-coigue. Dentro de los primeros estudios que reportan antecedentes de crecimiento en renovales destacan De Camino *et al*. (1974), Vita (1974) y Wadsworth (1976). Estos trabajos recopilan antecedentes fundamentalmente para renovales de raulí, y aportan antecedentes a nivel de crecimiento individual. No obstante, a nivel de bosque, los primeros antecedentes de crecimiento de renovales provienen de ensayos de raleo, que se resumen a continuación. Rocuant (1969) describe una serie de raleos en renovales de roble-raulí en la Cordillera de Nahuelbuta, proponiendo una serie de alternativas silvícolas en base a sus resultados. Puente *et al*. (1981) establecieron un ensayo de raleo en tres sitios seleccionados luego de una caracterización de los renovales de roble-raulí. Dos de los sitios de este ensayo han sido evaluados en cuatro ocasiones después de establecidos, siendo Pincheira (1993) quien realizó la primera evaluación silvícola de uno de los ensayos (sector Jauja, provincia de Malleco), y que reporta antecedentes concretos de crecimiento con y sin tratamientos de raleo en renovales de raulí-roble. El estudio de Puente *et al*. (1981) constituye el ensayo silvícola permanente de más larga data

mantenido hasta la actualidad en el país. El INFOR aportó con una serie de antecedentes de crecimiento provenientes de ensayos silvícolas permanentes establecidos por dicha institución (Grosse 1987, 1989, Grosse y Quiroz 1999). Es importante destacar que estos tres autores (Rocuant, Puente y Grosse) y sus colaboradores, a través de estos estudios formaron la base empírica que demostró las buenas respuestas silvícolas de los renovales de roble-raulí-coigue en Chile.

Posteriormente, algunos otros estudios han proporcionado antecedentes de crecimiento, pero no en base a mediciones directas en UMPs. Dentro de estos estudios se destacan Donoso *et al*. (1993a) que reportaron antecedentes de crecimiento medio en renovales de roble-raulí sin intervención en el centro-sur de Chile, mientras que Donoso *et al*. (1993b) recopilaron información de crecimiento para renovales manejados. Donoso *et al*. (1999) compararon el crecimiento de renovales sin intervención de coigue en la Cordillera de los Andes y de la Costa. Finalmente, es importante señalar que entre los ensayos silvícolas permanentes recopilados por Lara *et al*. (2000), muy pocos de éstos han sido remedidos efectivamente, lo cual confirma la falta de disponibilidad de datos de largo plazo para los bosques naturales de Chile en general. En resumen, existen sólo unas pocas y aisladas (en términos de estudios) UMPs en bosques de roble-raulí-coigue de Chile.

Método

Área de estudio. La información utilizada en este trabajo, corresponde a 74 unidades de muestreo permanente establecidas en renovales de roble-raulí-coigue y siete en bosques adultos en el centro-sur de Chile. Una parte de los datos han sido recopilados en el marco del estudio de Salas (2011), pero principalmente corresponden a UMPs establecidas en diversos estudios previos, y que fueron visitadas en terreno, evaluadas en su estado actual y remedidas en el marco de diversas investigaciones donde el autor principal ha estado involucrado (el detalle es especificado en la sección de agradecimientos). La distribución de las unidades de muestreo permanente empleadas (figura 4.3) muestra una buena representación de los renovales y así también de los pocos bosques adultos existentes en el centro-sur de Chile.

En cada una de estas UMPs se realizaron mediciones a nivel de árbol individual siguiendo un estricto procedimiento especificado en Salas (2016), pero que se resume en variables cuantitativas y cualitativas tanto en árboles vivos como en árboles muertos en pie con un diámetro a la altura del pecho (d) ≥ 5 cm. En algunas de estas UMP existen remediciones en el tiempo, y así también se cuenta con información de la ubicación espacial de cada individuo. A partir de dicha información, y mediante el empleo de un sistema de ecuaciones estimadoras complementarias (conocido como modelo dendrométrico), se estimaron las variables de estado de rodal: densidad (N); área basal (G); diámetro del árbol de área basal media (d_g) y volumen (V). Para la estimación de altura individual se emplearon modelos no-lineales previamente ajustados (i. e. Salas y Real 2013) para cada sitio en estudio. El volumen individual fue estimado mediante modelos especie-específicos, dentro de los cuales destacan los de Puente *et al*. (1981), Núñez *et al*. (1992) y Salas (2002), y en algunos casos los modelos recopilados por Drake *et al*. (2003). Mayores antecedentes específicos de procesamiento y estimación de variables pueden ser revisados en informes internos desarrollados para cada sitio.

Análisis de datos. A continuación, se presentan los principales resultados, siguiendo la siguiente estructura: (a) variables de estado, (b) crecimiento, (c) estructura diamétrica temporal y (d) patrones de distribución espacial. En el análisis de crecimiento, se calculó el incremento periódico anual [1] para cada una de las variables de estado de rodal. Además, se calculó la mortalidad, es decir, los individuos que han muerto en un periodo de análisis, y que corresponden a aquellos individuos que están presentes (y vivos) al inicio del periodo, pero no al final de éste. Así también se calculó el reclutamiento, es decir, el número de nuevos individuos que

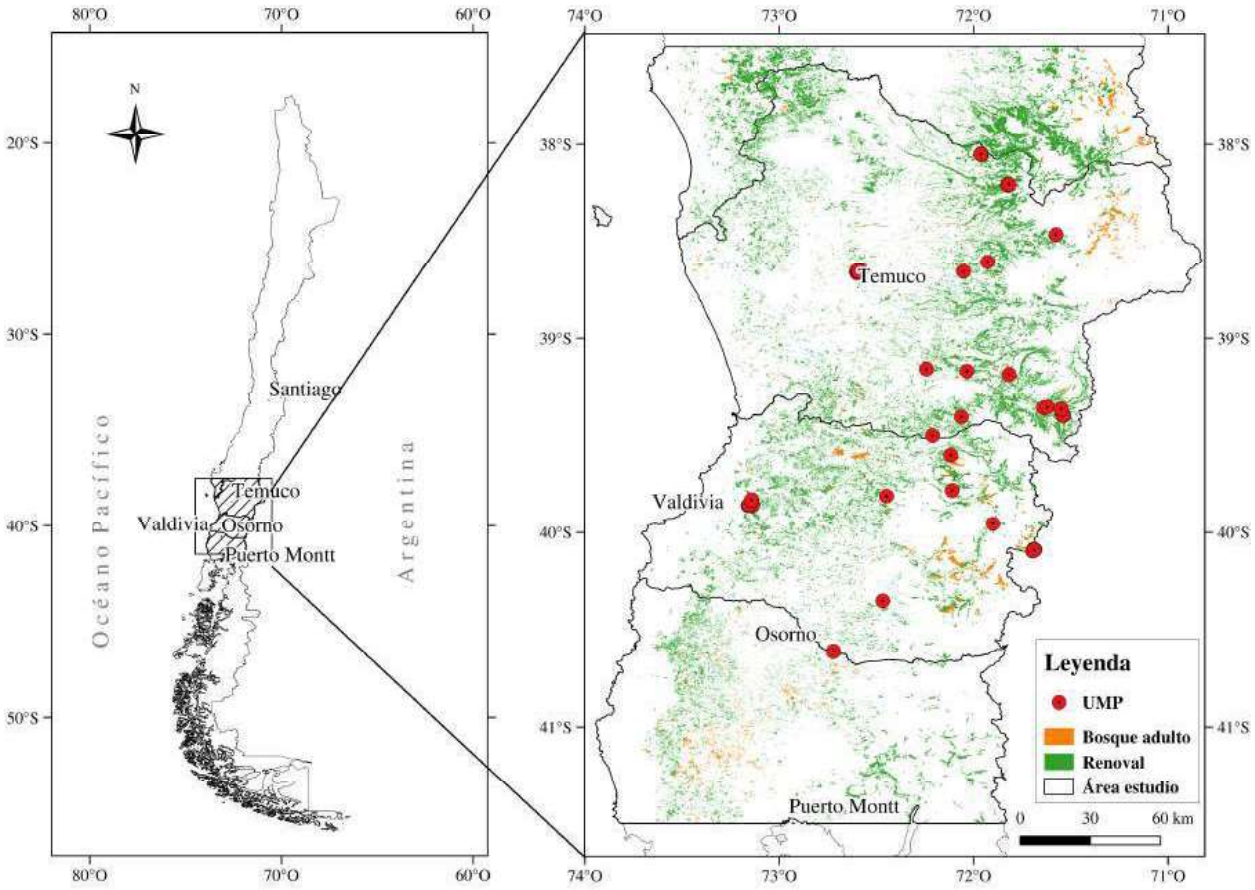

Figura 4.3 Rango de distribución geográfica de unidades de muestreo permanente (UMPs). Las unidades (círculos rojos) están ubicadas en renovales (verde) y bosques adultos (naranjo) del tipo forestal roble-raulí-coigue en el centro-sur de Chile (37 30′ – 41 30′ S)..

ingresaron al sistema de medición, y que corresponden a aquellos individuos que están presentes (y vivos) sólo al final de un periodo de análisis, pero no al principio de éste o bien no alcanzaron aún el límite inferior de medición del *d* de 5 cm.

Para el análisis espacial se empleó una UMP de 1 ha para cada tipo de bosque (secundario y adulto), y que se considera representativa para cada uno de ellos. Para la estimación de los patrones espaciales se ajustó la función *g(r)* de correlación entre pares de puntos (PCF, Stoyan y Stoyan 1996). Se prefirió esta función sobre otras similares (p. ej. *K* de Ripley 1976), siguiendo las recomendaciones dadas por Wiegand y Moloney (2014) en cuanto a ser una función con mejores características para analizar sistemas ecológicos. Los análisis espaciales se realizaron para los siguientes grupos: (i) todas las especies, (ii) para especies de *Nothofagus*, (iii) para otras especies (distintas de *Nothofagus*) y (iv) para los árboles muertos en pie. En el caso de bosque adulto, y dado que sólo para esta UMP se tienen mediciones en el tiempo de ubicación espacial de árboles, el ajuste de la función *g(r)* se realizó segregado para la medición inicial (t_0) y la final (t_1). Como en todo análisis espacial, los patrones posibles de distinguir por los modelos son: completamente aleatorio (cuando la función toma valores=1); agrupado (cuando la función toma valores > 1); o uniforme (cuando la función toma valores < 1). Para evaluar la incertidumbre en estos valores estimados, se calcularon intervalos confidenciales al 95 %, mediante simulaciones de Monte Carlo. Finalmente, se aclara que todos los análisis

realizados en la presente investigación fueron conducidos empleando el software R (R Development Core Team 2016). Para el análisis espacial se empleó el paquete *spatstat* (Baddeley y Turner 2005) de R .

Bosques secundarios

Variables de estado. Las variables de estado de las UMPs en los renovales muestreados poseen valores medianos de 1256 árb/ha en densidad, 44 m^2/ha de área basal, 22 cm de d_g y 402 m^3/ha de volumen (figura 4.4). La variabilidad, evaluada mediante el rango intercuartílico (rango que concentra el 50 % de la distribución de una variable), de estas variables es entre: 860–1805 árb/ha; 36–55 m^2/ha; 18–26 cm; y 300–520 m^3/ha en densidad; área basal; diámetro medio; y volumen, respectivamente.

Las UMP consideradas representan bosques en condiciones naturales sin intervención aparente, así como también a dos de los ensayos silviculturales establecidos en los sectores de Jauja (provincia de Malleco) y Casas Viejas (provincia de Cautín) por Puente *et al.* (1981). Las mediciones temporales en cada UMP muestra la evolución de las diferentes variables de estado en el tiempo (figura 4.5), demostrando un amplio rango de trayectorias de estas variables. El tiempo transcurrido entre mediciones oscila entre 5 y 18 años.

Crecimiento. A partir de las series de tiempo anteriores se calculo el *IPA* [1] para las variables de estado densidad, área basal y volumen. Una porción de las UMPs representadas en la figura 4.5 han sido sometidas a intervenciones silvícolas (diferentes tratamientos de raleo), y dado que para realizar un buen entendimiento de sus incrementos se requiere analizar y mostrar diferentes aspectos de estas intervenciones, no se han considerado en el presente trabajo ya que esto escapa al objetivo del estudio. Por lo tanto, en base a 26 UMPs, que representan condiciones de bosques sin intervención aparente, se calcularon los valores medios de los incrementos periódicos anuales (cuadro 4.1). Cabe mencionar que la mayoría de los antecedentes de crecimiento disponibles hasta el momento para renovales de roble-raulí-coigue (p. ej. De Camino *et al.* 1974, Wadsworth 1976, Donoso *et al.* 1993a) corresponden a incrementos medios anuales [2], no a incrementos periódicos [1], lo cual dificulta la comparación con los valores acá reportados. Así también, gran parte de la información de crecimiento para roble-raulí-coigue ha sido estudiada a nivel individual (p. ej. Vita 1974, Donoso *et al.* 1993b, 1999, Echeverría y Lara 2004, Thiers 2004, Donoso y Lusk 2007, Salas 2011) y no a nivel de bosque.

El incremento periódico anual (*IPA*) medio en área basal y en volumen es 0,61 m^2/ha/año y 8,5 m^3/ha/año, respectivamente. Los incrementos periódicos acá reportados debieran ser comparados con bosques que han sido medidos en al menos dos

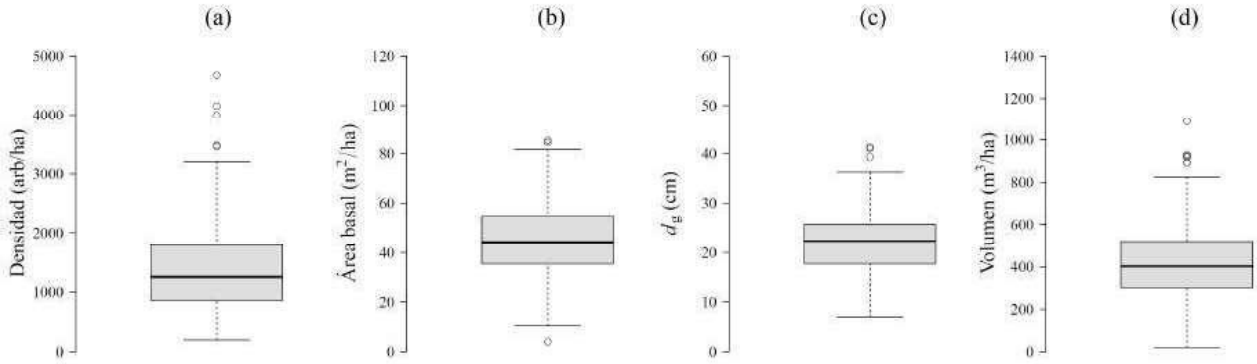

Figura 4.4 Distribución de las variables de estado: (a) densidad, (b) área basal, (c) diámetro del árbol de área basal media, simbolizado por d_g, y (d) volumen, para los bosques secundarios de roble-raulí-coigue. En este análisis se emplearon 74 unidades de muestreo permanente.

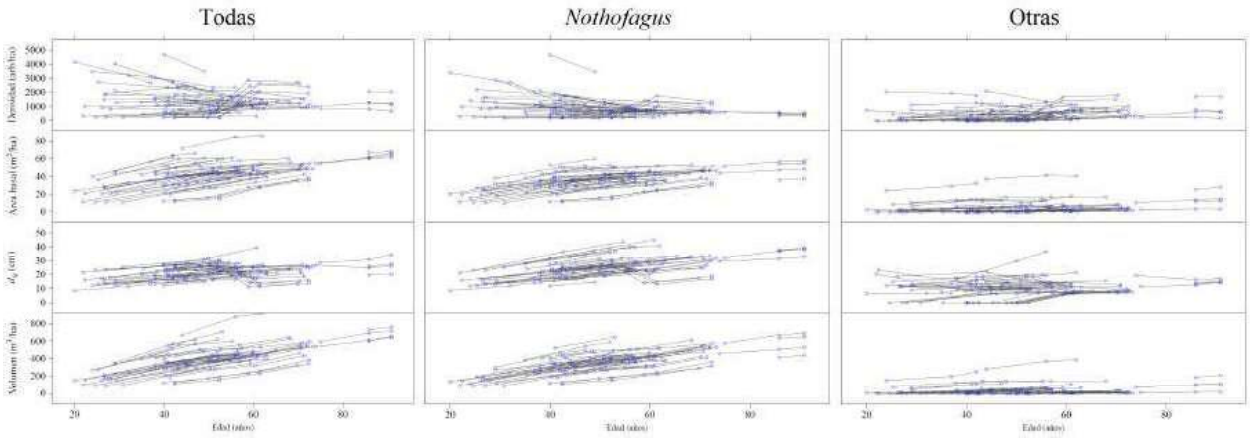

Figura 4.5 Series de tiempo de variables de estado para renovales de roble-raulí-coigue. Se presentan los resultados para todas las especies, sólo los *Nothofagus*, y otras especies distintas a *Nothofagus*. Para este análisis se emplearon 46 unidades de muestreo permanente remedidas al menos una vez. Puntos unidos por la misma línea representan a una unidad de muestreo.

Cuadro 4.1 Valores medios para el crecimiento de renovales sin intervención aparente de roble-raulí-coigue. Se presenta las tasas de incremento y mortalidad periódica anual de algunas variables estado de rodal, así como también el reclutamiento. Se utilizaron 26 unidades muéstrales permanentes para confeccionar este cuadro. Los renovales cubren un rango de edades entre los 20 y 90 años.

	Incremento			Mortalidad			Reclutamiento
Especies	Densidad (árb/ha/año)	Área basal (m^2/ha/año)	Volumen (m^3/ha/año)	Densidad (árb/ha/año)	Área basal (m^2/ha/año)	Volumen (m^3/ha/año)	Densidad (árb/ha/año)
Nothofagus	-31,4	0,42	6,6	34,8	0,36	2,7	3.5
Otras	3,7	0,19	1,9	17,3	0,12	0,6	20,7
Todas	-27,7	0,61	8,5	52,1	0,48	3,3	24,2

ocasiones en el tiempo, lo cual es posible casi exclusivamente con los ensayos silviculturales establecidos por el INFOR entre 1970 y la década de los 80. Para estos ensayos, Grosse *et al.* (1998) reportó *IPA*s en volumen desde 2,8 a 6,4 m^3/ha/año para renovales sin intervención de entre 44 y 70 años de edad. Es vital aclarar que el *IPA* en volumen reportado en el presente estudio (8,5 m^3/ha/año) es para renovales que cubren mayoritariamente edades entre los 40 y 80 años. Es decir, bosques que ya han pasado el cierre de copas, el cual debiera ocurrir alrededor entre los 20 y 40 años. Esto implica que los incrementos serán mayores para renovales de menores edades donde no se ha alcanzado el cierre de copas. Por ejemplo, Grosse (1987) reportó *IPA* en volumen de 12–16 m^3/ha/año para renovales sin intervención entre los 28 y 47 años de edad. El rango de *IPA* en volumen en el presente estudio oscila entre 3,6 a 18,1 m^3/ha/año. El valor superior del rango es congruente con lo reportado por Grosse, demostrando que existen periodos donde los renovales eran más jóvenes y crecían a una mayor tasa. En el estudio de Rocuant (1969) se reportó un *IPA* muy inferior para renovales de roble-raulí en Nahuelbuta con edades entre 30 y 40 años, de 5,8 m^3/ha/año. Sin embargo, el valor reportado por Rocuant es basado en una sola unidad muestral.

La mortalidad natural es un proceso clave para entender la dinámica de los bosques. A pesar de esto, la mortalidad de los bosques de roble-raulí-coigue es

un aspecto muy poco estudiado. No tan sólo la mortalidad como tal, es decir, el proceso dinámico sino que también es muy poca la información existente sobre árboles muertos en pie, ya que es una variable que no se ha registrado normalmente en los bosques naturales chilenos, salvo en algunos estudios (Salas *et al*. 2006). Tan sólo Rodriguez (1993) describió la mortalidad de renovales, pero esto fue restringido a un sólo ensayo de raleo. Como se observa en el cuadro 4.1, la mortalidad en bosques secundarios es mayor para los *Nothofagus* que para las otras especies distintas a *Nothofagus*. Esto se debe a que los *Nothofagus* son especies pioneras, y que en la etapa de desarrollo actual (la mayoría siendo bosques hoy de entre 60 y 80 años) los individuos suprimidos de este género no son capaces de sobrevivir.

En el presente estudio se ha calculado la mortalidad en términos de diferentes variables que no tan sólo representan su densidad, sino que también ayudan a expresar la producción de materia, como lo son el área basal y el volumen (cuadro 4.1). La disminución bruta en volumen, es decir, el volumen que tenían los árboles que murieron en el período, es en promedio equivalente a 3,3 m^3/ha/año. Si sumamos esta disminución bruta al *IPA* en volumen de los árboles vivos (8,5 m^3/ha/año), se obtiene un incremento bruto de 11,8 m^3/ha/año.

El reclutamiento de especies en bosques naturales chilenos es también un proceso ecológico poco estudiado, y menos aún se ha cuantificado en detalle. El reclutamiento de especies en estos renovales es claramente dominado por especies tolerantes y semitolerantes, p. ej. laurel (*Laurelia sempervirens*), lingue (*Persea lingue*), olivillo (*Aextoxicon punctatum*), a una tasa de 20,7 arb/ha/año. Es importante destacar que este valor sólo representa a individuos que poseen un $d \geq 5$ cm, y no considera a la regeneración de plántulas y brinzales. El reclutamiento medio de *Nothofagus* en estos bosques es mínimo y sin un mayor éxito futuro de desarrollo debido a que el dosel del bosque se encuentra muy cerrado y el piso del bosque no cuenta con suelo mineral descubierto. Los pocos individuos de *Nothofagus* en condición de reclutamiento corresponden a individuos que se han establecido producto de la germinación de semillas sobre troncos (especialmente de coigue) o bien algún rebrote de tocón aislado de roble o raulí.

Estructura diamétrica temporal. La estructura de tamaños de los bosques es fácilmente representada mediante la distribución diamétrica. Es conocido que los bosques secundarios, debido a su estructura coetánea, poseen distribuciones semejantes a la descrita por la función de probabilidades de Gauss o curva Normal (Daniel *et al*. 1979). La variación de la forma en la distribución diamétrica en el tiempo es clave para entender la dinámica de los bosques. Puente *et al*. (1979) al emplear parcelas de muestreo temporales y registro de tarugos de incremento en éstas, mostró las distribuciones diamétricas medias de renovales entre los 30 y 50 años. En el presente trabajo, avanzamos en representar la estructura diamétrica de renovales sin intervención de raulí hasta los 70 años de edad, en base a siete parcelas de 2000 m^2 del ensayo de raleo establecido por Puente *et al*. (1981). La distribución diamétrica varía desde una forma de tipo exponencial negativa (J-inversa), pero con una pequeña amplitud hacia una distribución normal asimétrica a los 70 años (primera fila de la figura 4.6).

Al estudiar la variación de la estructura diamétrica segregada por grupos de especies (segunda fila de la figura 4.6), los *Nothofagus*, muestran claramente el fuerte proceso de selección natural (producto de la competencia), la que se mantiene en el tiempo, pero a menores tasas. Se parte con distribuciones de J-inversa (pero con diámetros máximos menores a 20 cm), incluso a los 30 años, la cual paulatinamente va desplazándose hacia distribuciones de tipo Gaussiana con cierto nivel de asimetría (entre los 40 y 60), hasta distribuciones del mismo tipo, pero más extendidas (en sus diámetros) a los 70 años. Por otra parte, se ve como el grupo de otras especies, las cuales corresponden a especies semitolerantes y tolerantes, va también aumentando su participación en las clases de tamaño mayores a medida que transcurre el tiempo.

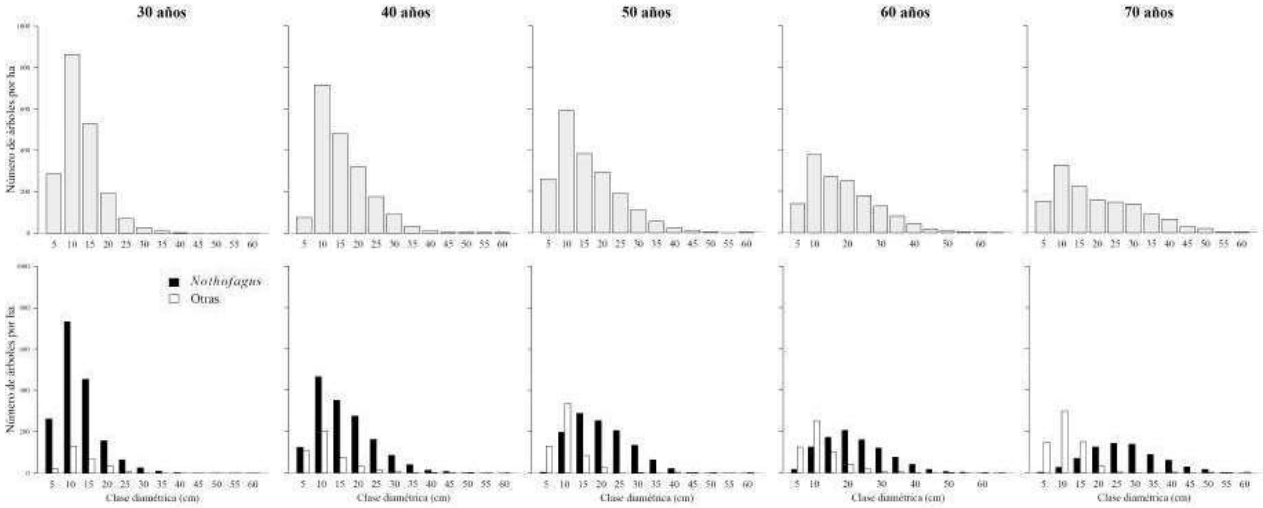

Figura 4.6 Variación temporal de la distribución diamétrica en renovales de roble-raulí-coigue a diferentes edades. La primera fila de la figura considera a todas las especies, mientras que la segunda fila segrega la distribución por grupos de especies (i. e. *Nothofagus* y otras distintas a *Nothofagus*). Las distribuciones medias se calcularon en función de tres unidades de muestreo (de 2.000 m^2 de superficie) remedidas a diferentes edades en renovales de raulí-roble en Jauja (provincia de Malleco) y Casas Viejas (provincia de Cautín).

Patrones espaciales. Empleando una UMP de 1 ha establecida en un bosque secundario de 50 años de raulí en Curacautín (Marcoleta 2005), se estudiaron los patrones espaciales mediante el calculo de la función *g(r)*. Se observa claramente un patrón agrupado para todos los árboles (figura 4.7a). Este patrón fue descrito también por Martin (1994) para todas las especies en renovales de raulí. El patrón agrupado para raulí (figura 4.7b) se debe a la alta reproducción vegetativa que esta especie tiene, aunque el patrón es aún más fuerte para las otras especies (figura 4.7c). Este mismo patrón se hace mucho mas intenso para los árboles muertos en pie (figura 4.7d).

Bosques adultos

Variables de estado. La información de bosque adulto proviene de siete unidades de muestreo permanente (seis de 1.000 m^2 y una de 1 ha) establecidas en Rucamanque (provincia de Cautín). Este es un bosque remanente original de los bosques del tipo forestal de roble-raulí-coigue (Salas *et al*. 2006). La dinámica de este tipo de bosques ha sido descrito en Veblen *et al*. (1979, 1980) y Donoso (1995). Estos bosques presentan muy pocos individuos de *Nothofagus*, (en Rucamanque es sólo roble), siendo éstos los árboles con mayores diámetros y alturas. Las variables de estado de las UMPs en los bosques muestreados poseen valores medianos de 410 árb/ha en densidad, 91 m^2/ha de área basal, 51 cm de d_g y 1.020 m^3/ha de volumen (figura 4.8). La variabilidad, evaluada mediante el rango intercuartílico (figura 4.8), de estas variables es entre: 380-646 árb/ha; 83–95 m^2/ha; 46–56 cm; y 885–1.140 m^3/ha en densidad, área basal, diámetro medio y volumen, respectivamente.

Crecimiento. No existen antecedentes sobre crecimiento en bosques adultos, salvo los antecedentes de crecimiento individual en diámetro para algunos árboles dados por Neumann (2001). Menos aún existen antecedentes sobre mortalidad y reclutamiento de estos bosques. Empleando información proveniente de siete UMPs remedidas en un periodo de nueve años, se reportan valores de incremento, mortalidad, y reclutamiento (cuadro 4.2). Como se observa en dicho cuadro, la mortalidad en bosques adultos es principalmente para las otras especies,

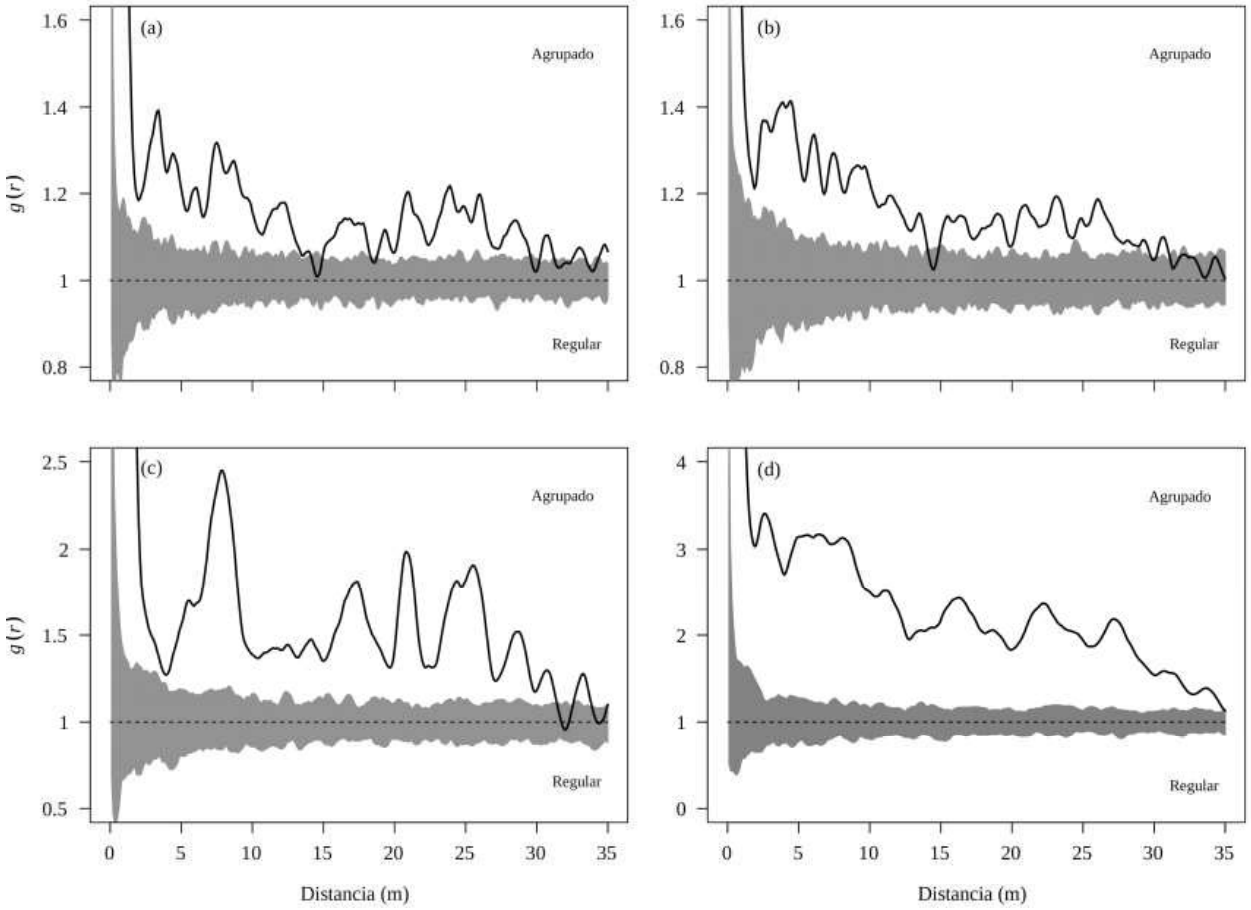

Figura 4.7 Patrones de distribución espacial de árboles en un bosque secundario de raulí de 50 años en Curacautín (provincia de Malleco). La unidad de muestreo permanente empleada es de 1 ha de superficie. La línea continua representa al valor estimado por la función g(r) y la línea segmentada representa un patrón espacial completamente aleatorio. La región sombreada corresponde al intervalo confidencial al 95 % para un patrón aleatorio. En la figura, (a) corresponde a todas las especies, (b) raulí, (c) otras especies distintas a *Nothofagus*, y (d) árboles muertos en pie.

Cuadro 4.2 Valores medios para el crecimiento de bosques adultos de roble-olivillo-ulmo en Rucamanque (provincia de Cautín). Se presenta las tasas de incremento y mortalidad periódica anual de algunas variables estado de rodal, así como también el reclutamiento. Siete unidades muestrales permanentes fueron utilizadas para confeccionar este cuadro, y los bosques muestreados son sin intervención aparente.

	Incremento			Mortalidad			Reclutamiento
Especies	Densidad (árb/ha/año)	Área basal (m^2/ha/año)	Volumen (m^3/ha/año)	Densidad (árb/ha/año)	Área basal (m^2/ha/año)	Volumen (m^3/ha/año)	Densidad (árb/ha/año)
Nothofagus	-0,1	0,02	0,2	0,1	0,03	0,4	0,0
Otras	-0,8	-0,28	-3,9	3,9	0,60	6,6	3,1
Todas	-0,9	-0,26	-3,7	4,0	0,63	7,0	3,1

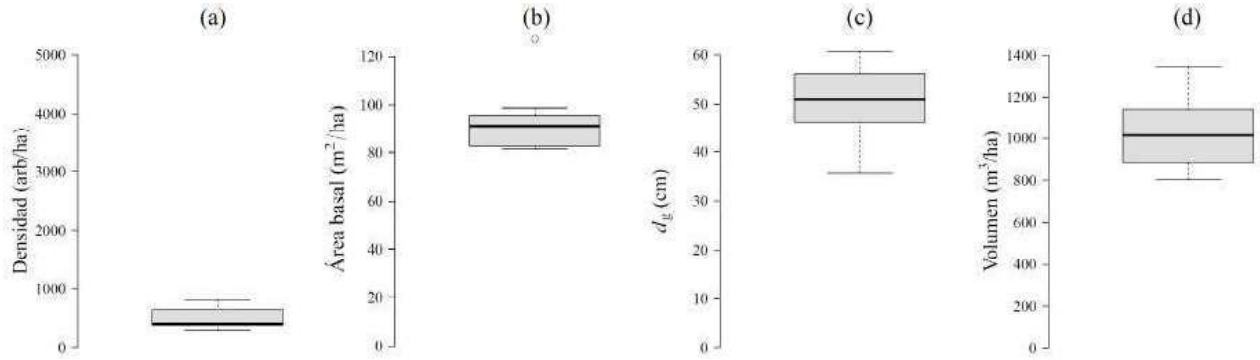

Figura 4.8 Distribución de las variables de estado: (a) densidad, (b) área basal, (c) diámetro del árbol de área basal media, simbolizado por d_g, y (d) volumen, para los bosques adultos de roble-olivillo-ulmo obtenidas de siete unidades de muestreo permanente.

mientras que el reclutamiento de los *Nothofagus* es prácticamente cero. Esto se debe a que roble es una especie intolerante a la sombra, incapaz de establecerse en las condiciones del sotobosque de bosques adultos.

Estructura diamétrica temporal. La estructura de tamaños de los bosques adultos ha sido fuente de muchas investigaciones y descrito desde los trabajos pioneros de De Liocourt (1898) y Meyer (1952) que fundamentan la silvicultura de tipo multietánea (O'Hara 2014). La variación temporal de la forma en la distribución diamétrica en el tiempo no ha sido descrita para bosques adultos chilenos. En el periodo de observación, la distribución diamétrica presenta una variación bastante sutil, con un cambio en la menor clase diamétrica, pero claramente con una distribución de tipo J-inversa, con una gran amplitud diamétrica alcanzando hasta *d* de 160 cm (figura 4.9).

Al estudiar la variación de la estructura diamétrica segregado por grupos de especies (segunda fila de la figura 4.9), se observa que *Nothofagus*, muestra claramente una distribución de tamaños totalmente desplazada hacia los mayores diámetros y bastante aplanada, con una densidad total de unos 20-30 árb/ha. Las otras especies, sobretodo olivillo y *Laureliopsis philippiana* (tepa), tienen una distribución de tipo exponencial negativa. La variación en casi una década de la estructura de diámetros muestra sólo pequeños cambios en algunas clases diamétricas, pero de muy baja magnitud, demostrando la estabilidad sucesional de estos bosques.

Patrones espaciales. Análisis espaciales de especies arbóreas de bosques adultos han sido reportados en Salas *et al.* (2006), sin embargo, ningún estudio ha descrito la variación de los patrones espaciales en el tiempo. A pesar del corto periodo de tiempo disponible para el bosque adulto, se puede observar un cambio en los patrones espaciales de estos ecosistemas (figura 10). Todas las especies en conjunto, al inicio del período (año 2003), presentan una distribución agrupada a distancias de entre 2-25 metros, mientras que para el 2012 la agregación espacial de los árboles disminuye, ocurriendo en distancias entre 2-15 metros (figura 10a,e). En forma similar, las especies diferentes a *Nothofagus*, esto es las "otras especies" (figura 10c,g), presentan la misma distribución espacial señalada anteriormente. Algo distinto ocurre al considerar sólo a roble (figura 10b,f), que presenta una distribución completamente al azar para el 2003 y para 2012. No obstante, la poca cantidad de observaciones de este grupo, hace que los intervalos confidenciales sean muy amplios, siendo difícil poder discriminar de un patrón aleatorio. Los árboles muertos en pie también presentan una distribución al azar para el periodo de tiempo analizado (figura 10d,h).

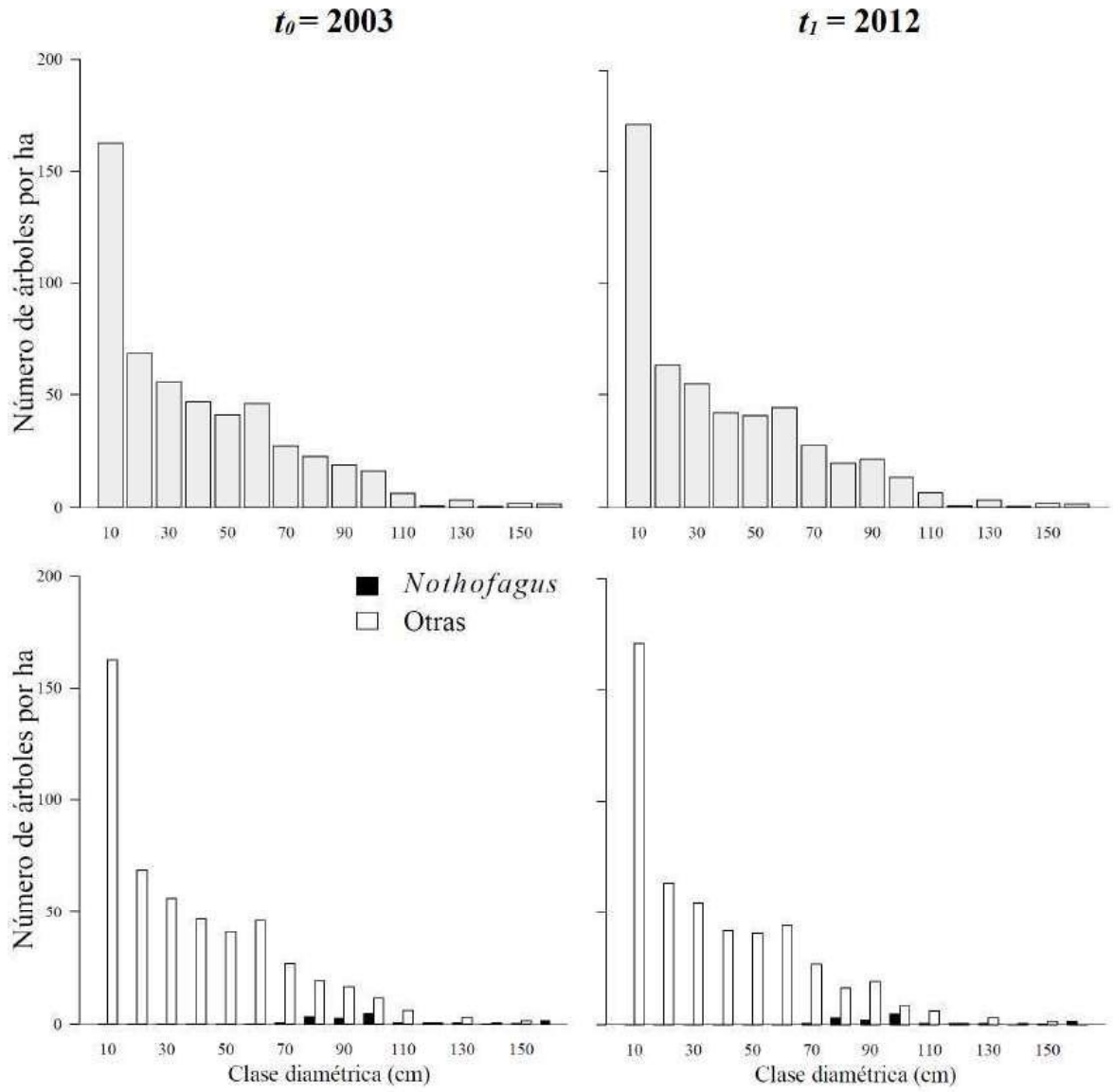

Figura 4.9 Variación temporal de la distribución diamétrica en bosques adultos de roble-olivillo-ulmo. La primera fila de la figura considera a todas las especies, mientras que la segunda fila segrega la distribución por grupos de especies (*Nothofagus* y otras). Las distribuciones medias se calcularon empleando siete unidades de muestreo medidas en dos ocasiones en Rucamanque (provincia de Cautín).

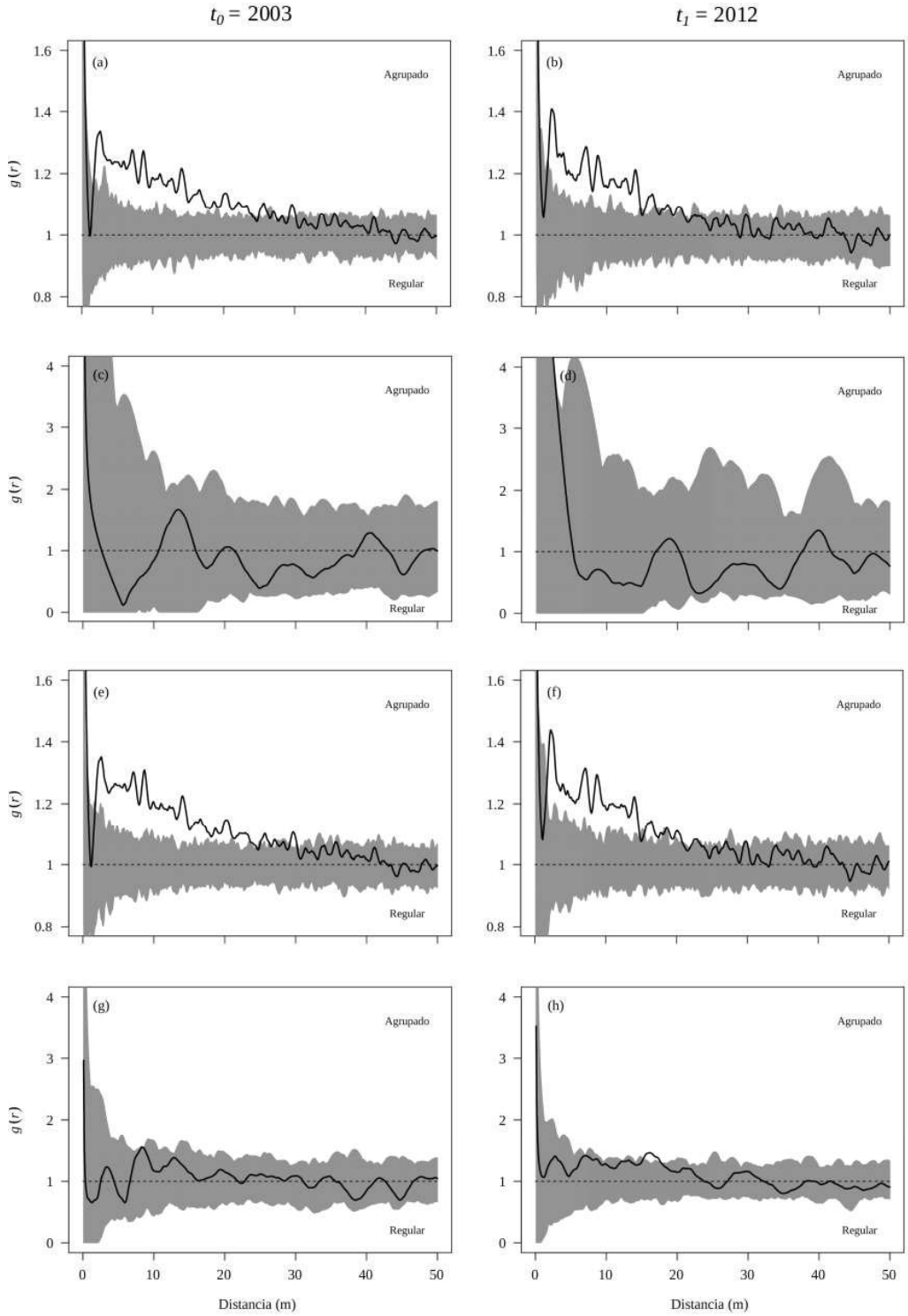

Figura 4.10 Patrones de distribución espacial de árboles en un bosque adulto de roble-olivillo-ulmo en Rucamanque (Provincia de Cautín). La unidad de muestreo de referencia es de 1 ha de superficie (Salas *et al*. 2006). La línea continua representa al valor estimado por la función g(r) y la línea segmentada representa un patrón espacial completamente aleatorio. La región sombreada corresponde al intervalo confidencial al 95 % para un patrón aleatorio. En la figura: (a) y (b) corresponde a todas las especies; (c) y (d) roble; (e) y (f) otras especies; y (g) y (h) árboles muertos en pie, para los años 2003 y 2012.

Conclusiones y comentarios finales

En el presente capítulo se han revisado cuantitativamente una serie de variables asociadas al crecimiento de bosques secundarios y adultos de *Nothofagus* en el centro-sur de Chile – variables de estado, estructura diamétrica, crecimiento (i. e. incremento, reclutamiento y mortalidad), y el patrón de distribución espacial. Si bien existen diversos estudios sobre la dinámica de los bosques de roble-raulí-coigue, todos ellos asumen y emplean estudios del tipo cronosecuencia, donde se reemplaza el espacio por el tiempo (Johnson y Miyanishi 2008). Sin embargo, este supuesto no es tan válido en ecosistemas forestales, donde existen muchos factores que interactúan simultáneamente influenciando la estructura y composición de los bosques (Norden *et al*. 2015). Es por esto, que es vital poder describir la dinámica del bosque a partir de mediciones temporales en las mismas unidades muestrales, y así evaluar directamente el cambio y variación del ecosistema. Un hito relevante de destacar es que el presente estudio muestra una evaluación cuantitativa en base a unidades de muestreo permanente, aportando importantes antecedentes de la dinámica de los bosques de *Nothofagus* en Chile. Además, esto sirve de base para su uso en tomas de decisiones silvícolas, manejo y conservación.

Como es de esperar, existen diferencias marcadas en el crecimiento de renovales versus bosque adulto, destacándose mayores tasas de crecimiento en renovales. Por ejemplo, la estructura diamétrica de los árboles de *Nothofagus* muestra claramente el fuerte proceso de selección natural (competencia), la cual se mantiene en el tiempo y que se inicia con distribuciones de tipo exponencial negativa con una baja amplitud diamétrica y que se mantiene incluso a los 40 años, hasta alcanzar distribuciones que se asemejan a una distribución Gaussiana aplanada, o extendida, a los 70 años.

Interesante es destacar que a pesar del corto periodo de remedición disponible en nuestra investigación (i. e. 9 años), los bosques adultos presentan un alto dinamismo en cuanto a su distribución espacial, reclutamiento y mortalidad. Por ejemplo, al evaluar el patrón espacial del bosque adulto para todas las especies en conjunto, se tiene que los árboles en el año 2003 presentaron una distribución agrupada entre distancias de 2-25 metros, mientras que para el 2012 la agregación espacial de los árboles disminuye, ocurriendo en distancias entre 2-15 metros. Estos datos, sumados a toda la información entregada en el presente capítulo reafirma la necesidad de seguir monitoreando las UMP ubicada en este tipo de bosques para seguir evaluado su dinámica y motivar la implementación de UMPs en otros tipos de bosques, integrando además un mayor trabajo colaborativo.

Es relevante destacar el alto potencial productivo que tienen los bosques nativos del centro-sur de Chile cuando son manejados adecuadamente. Así, este trabajo resalta el alto incremento en volumen y reclutamiento de los bosques de roble-raulí-coigue, incluso sin manejo silvícola. A esto se agrega la existencia de estudios sobre el efecto de tratamientos silviculturales en plantaciones de *Nothofagus* (p. ej. Donoso *et al*. 2009, 2013) que han demostrado tasas de crecimiento comparables a plantaciones forestales de especies exóticas en Chile y de similar rentabilidad económica (Cubbage *et al*. 2007, Donoso *et al*. 2015). Finalmente, es vital poder contar con estudios de largo plazo (Franklin 1989, Armesto 1990, Franklin y Swanson 2010), tanto en renovales como en bosques adultos para tener información confiable que permita estudiar su ecología y productividad, a fin de proveer herramientas de manejo para su uso sustentable.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDECYT Nº 1151495. No obstante, ha sido beneficiada de una serie de proyectos anteriores que contribuyeron a las mediciones y remediciones, dentro de los cuales destacan los proyectos: FIBN Nº 027/2016 (UFRO), CONAF/PNUD/FAO-CHI/76/003 (UACH); FONDEF Nº D97I1065 (UACH); FIBN Nº 068/2010 (UFRO); FONDECYT Nº 1110744 (UACH/UFRO) Así también quisiéramos agradecer a: Dra.

Alicia Ortega (UACH), Dr. Hans Grosse (INFOR), y Patricio Núñez (UFRO), por facilitar algunos datos empleados. AFR agradece a FONDECYT Nº 11150487 y la VRIP de la Universidad de La Frontera.

Referencias

Agren GI. 1981. Problems involved in modelling tree growth. In Linder S (ed.) Understanding and predicting tree growth, Studia Forestalia Suecica No. 160. Proc. SWECON Workshop, Uppsala, Sweeden. College of Forestry, Swedish University of Agricultural Sciences. p. 7–18.

Akca A, H Krammer. 1980. Leifanden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Berlin, Germany. Verlag Frankfurt am Main. 281 p.

Armesto JJ. 1990. Estudios a largo plazo: una prioridad para la investigación ecológica de hoy. *Revista. Chilena de Historia Natural* 63:7–9.

Armesto JJ, JF Franklin, MK Arroyo, C Smith-Ramírez. 1999. El sistema de cosecha con "retención variable": una alternativa de manejo para conciliar los objetivos de conservación y producción en los bosques nativos chilenos. In Donoso C, A Lara eds. Silvicultura de bosques nativos de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. p. 69–94.

Baddeley A, R Turner. 2005. spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software* 12(6):1–42.

Baker FS. 1950. Principles of Silviculture. New York, USA. McGraw-Hill. 414 p.

Beetson T, M Nester, J Vanclay. 1992. Enhancing a permanent sample plot system in natural forests. *The Statistician* 41(5):525–538.

Bruce D. 1981. Consistent height-growth and growth-rate estimates for remeasured plots. *Forest Science* 27(4):711–725.

Campbell JT. 1885. Age of forest trees. *The American Naturalist* 19(9):838–844.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2013. Por un Chile forestal sustentable. Santiago, Chile. 83 p.

Cubbage F, PM Donagh, JS Junior, R Rubilar, P Donoso, A Ferreira, V Hoeflich, VM Olmos, G Ferreira, G Balmelli, J Siry, MN Báez, J Alvarez. 2007. Timber investment returns for selected plantation and native forests in South America and the southern United States. *New Forests* 33(3):237–255.

Daniel TW, JA Helms, FS Baker. 1979. Principles of Silviculture. 2nd edition. New York, USA. McGraw-Hill. 500 p.

De Camino R, B Smith, M Benavides, J Rodas. 1974. Los renovales del bosque nativo como recurso forestal. antecedentes para la discusión del problema. In Charlas y Conferencias No. 2, Instituto de Manejo y Economía Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. p. 25–39.

De Liocourt F. 1898. De l'amenagement des sapinieres. Bulletin trimestriel, Societé forestiere de Franche-Comté et Belfort. Pp: 396–409, (in French, Translated by M. Nygren in 2001, School of Natural Resources, University of Missouri-Columbia).

Donoso C. 1995. Bosques templados de Chile y Argentina: Variación, estructura y dinámica. 3rd edition. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 484 p.

Donoso C. 2006. ¿Qué pasa con el manejo de los bosques nativos? *Chile Forestal* 324:23.

Donoso P, C Donoso, V Sandoval. 1993a. Proposición de zonas de crecimiento de renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución natural. Bosque 14(2):37–55.

Donoso P, T Monfil, L Otero, V Barraces. 1993b. 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):253–288.

Donoso PJ, C Cabezas, A Lavanderos, C Donoso. 1999. Estudio comparativo de la estructura y crecimiento de renovales de coihue (*Nothofagus dombeyi*) en la precordillera de la Costa y de los Andes de la provincia de Valdivia. *Bosque* 20(2):9–23.

Donoso PJ, CH Lusk. 2007. Differential effects of emergent *Nothofagus dombeyi* on growth and basal area of canopy species in an old-growth temperate rainforest. *Journal of Vegetation Science* 18(5):675–684.

Donoso PJ, C Navarro, DP Soto, V Gerding, O Thiers, J Pinares, B Escobar, MJ Sanhueza. 2015. Manual de plantaciones de raulí (*Nothofagus alpina*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*) en Chile. Temuco, Chile, 203 p.

Donoso PJ, DP Soto, RE Coopman, S Rodriguez-Bertos. 2013. Early performance of planted *Nothofagus dombeyi* and *Nothofagus nervosa* in response to light availability and gap size in a high-graded forest in the south-central Andes of Chile. *Bosque* 33(1):23–32.

Donoso PJ, DP Soto, JE Schlatter, CA Buchner. 2009. Effects of early fertilization on the performance of planted *Nothofagus dombeyi* in coastal Range of south-central Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 36(3):459–469.

Drake F, P Emanuelli, E Acuña. 2003. Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo. Santiago, Chile. Universidad de Concepción y Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo (CONAF-KfW-DED-GTZ). 196 p.

Echeverría C, A Lara. 2004. Growth patterns of secondary *Nothofagus obliqua–N. alpina* forests in southern Chile. *Forest Ecology and Management* 195:29–43.

Ek AR, RA Monserud. 1975. Methodology for modeling forest stand dynamics. Department of Forestry, University of Wisconsin–Madison, Staff Paper Series No. 2. Madison, WI, USA. 30 p.

Franklin JF. 1989. Importance and justification of long-term studies in ecology, p. 3–19. Springer-Verlag, New York.

Franklin JF, HH Shugart, ME Harmon. 1987. Tree death as an ecological process. *BioScience* 37(8):550–556.

Franklin JF, ME Swanson. 2010. Long-term ecological research in the forests of the United States: Key lessons for its application in Chile and around the world. *Rev. Chilena de Historia Natural* 83:185–194.

Franklin P. 1944. Methods of Advanced Calculus. New York, USA. McGraw Hill Book Company, Inc. 486 p.

Grosse H. 1987. Desarrollo de renovales de raulí raleados. *Ciencia e Investigación Forestal* 1(2):31–43.

Grosse H. 1989. Renovales de raulí, roble, coigue y tepa, expectativas de rendimiento. *Ciencia e Investigación Forestal* 3(6):37–72.

Grosse H, M Pincheira, I Quiroz. 1998. Renovales de raulí y roble en el sur de Chile. In Primer Congreso Latinoamericano IUFRO.

Grosse H, I Quiroz. 1999. Silvicultura de los bosques de segundo crecimiento de roble, raulÍ y coigue en la región centro-sur de Chile. In Donoso C, A Lara eds. Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. p. 95–125.

Johnson EA, K Miyanishi. 2008. Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters* 11(5):419–431.

Lara A, C Echverría, C Donoso. 2000. Guía de Ensayos Silviculturales Permanentes en los Bosques Nativos de Chile. Santiago, Chile. LOM Ediciones. 244 p.

Lara A, C Little, C Donoso, C Moreno. 2010. Investigación de largo plazo en Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural* 83:617–618.

Marcoleta A. 2005. Evaluación del método de muestreo centrado en el árbol futuro mediante simulación computacional en un renoval de *Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. 49 p.

Martin M. 1994. Análisis espacial en renovales de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) (Oerst)) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp et Endl)). *Ciencia e Investigación Forestal* 8(2):277–300.

McGinnies WG. 1963. Dendrocronology. *Journal of Forestry* 61(1):5–11.

Meyer HA. 1952. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests. *Journal of Forestry* 50(2):85–92.

Monserud RA. 1986. Time-series analyses of tree-ring chronologies. *Forest Science* 32(2):349–372.

Neumann R. 2001. Análisis de estructura y dinámica de un bosque remanente original de Roble-Laurel-Lingue, en el fundo San Julián, comuna de Panguipulli, X Región. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 103 p.

Norden N, HA Angarita, F Bongers, M Martínez-Ramos, In Granzow-de la Cerda, M van Breugel, E Lebrija-Trejos, JA Meave, J Vandermeer, GB Williamson, B Finegan, R Mesquita, RL Chazdon. 2015. Successional dynamics in neotropical forests are as uncertain as they are predictable. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(26):8013–8018.

Núñez P, P Real, R Grez, V Sandoval, K Krause. 1992. Proyecto diagnóstico y caracterización del estado actual y proposiciones de metodologías para evaluar el bosque nativo de la empresa Soc. Forestal Millalemu S.A. (Etapa II: Proposiciones y evaluaciones de intervenciones silvícolas). Informe de convenio No. 207, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile. 150 p.

Odin H. 1972. Studies of the increment rhythm of Scots pine and Norway spruce plants. Royal College of Forestry, Swedish University of Agricultural Sciences, Studia Forestalia Suecica No. 97. Stockholm, Sweden. 32 p.

O'Hara K. 2014. Multiaged Silviculture: Managing for Complex Forest Stand Structures. New York, USA. Oxford University Press. 213 p.

Pincheira M. 1993. Evaluación de raleos aplicados en un renoval de raulí (*Nothofagus alpina*) y roble (*Nothofagus obliqua*) ubicado en el fundo Jauja, provincia de Malleco, IX región. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 68 p.

Puente M. 1979. Control de raleos en renovales de Raulí. (INFORSA). Informe convenio No. 4, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ingeniería Forestal, Valdivia, Chile. 38 p.

Puente M, C Donoso, R Peñaloza, E Morales. 1979. Estudio de raleo y otras técnicas para el manejo de renovales de raulí (*Nothofagus alpina*) y roble (*Nothofagus obliqua*). Etapa I: Identificación y caracterización de renovales de raulí y roble. Informe de convenio No. 5, Proyecto CONAF/PNUD/FAO-CHI/76/003, Santiago, Chile. 88 p.

Puente M, R Peñaloza, C Donoso, R Paredes, P Núñez, E Morales, O Engdahl. 1981. Estudio de raleo y otras técnicas para el manejo de renovales de raulí (*Nothofagus*

alpina) y roble (*Nothofagus obliqua*). Etapa II: Instalación de ensayos de raleo. Documento de trabajo No. 41, Proyecto CONAF/PNUD/FAO-CHI/76/003, Santiago, Chile. 63 p.

R Development Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. http://www.R-project.org.

Ripley BD. 1976. The second-order analysis of stationary processes. *Journal of Applied Probability* 13:255–266.

Rocuant L. 1969. Raleos en renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) (mirb) y raulí (*Nothofagus alpina*) (Poepp. et Endl.) en la Cordillera de Nahuelbuta. Circular Informativa No. 26, Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción, Chillán, Chile. 8 p.

Rodriguez C. 1993. Estimación de la mortalidad natural en los renovales de roble y raulí entre 20 y 50 años de edad. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 67 p.

Salas C. 2002. Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de roble-laurel-lingue. *Bosque* 23(2):81–92.

Salas C. 2011. Modelling tree height growth of *Nothofagus* forests in south-central Chile: Merging differential equations and mixed-effects models. Ph.D. Dissertation, Yale University, New Haven, CT, USA. 158 p.

Salas C. 2016. Manual de procedimientos para el establecimiento y remedición de unidades de muestreo permanente en bosques naturales. Informe Interno 1, Proyecto FONDECYT No. 1151495, Laboratorio de Biometría, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. 17 p.

Salas C, PJ Donoso, R Vargas, CA Arriagada, R Pedraza, DP Soto. 2016. The forest sector in Chile: an overview and current challenges. *Journal of Forestry* 114(5): 562–571.

Salas C, V LeMay, P Núñez, P Pacheco, A Espinosa. 2006. Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology and Management* 231(1-3):38–46.

Salas C, P Real. 2013. Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte. In Donoso P, A Promis eds. Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones. p. 109–151.

Seger SL, SD Harlow. 1987. Mathematical models from laws of growth to tools for biological analysis: Fifty years of growth. *Growth* 51:1–21.

Spurr SH. 1952. Forest Inventory. New York, USA. Ronald Press. 476 p.

Stoyan D, H Stoyan. 1996. Estimating pair correlation functions of planar cluster processes. *Biometrical Journal* 38(3):259–271.

Taras MA, HE Wadlgren. 1963. A comparison of increment core sampling for estimating tree specific gravity. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-7, USA. 14 p.

Thiers O. 2004. Roble (*Nothofagus obliqua* [Mirb.] Oerst.) - sekundarwalder in zentral- und sudchile: Bestimmung der fur die bestandesproduktivitat wichtigen standortsfaktoren. Doctor rer. nat. dissertation, Albert-Ludwigs-Universitat Freiburg im Breisgau, Freiburg, Germany. 170 p.

van Laar A, A Akca. 2007. Forest Mensuration. Dordrecht, The Netherlands. Springer. 383 p.

van Mantgem PJ, NL Stephenson. 2004. Does coring contribute to tree mortality? *Canadian Journal of Forest Research* 34:2394–2398.

Veblen TT, DH Ashton, FM Schlegel. 1979. Tree regeneration strategies in a lowland *Nothofagus*-dominated forest in south-central Chile. *Journal of Biogeography* 6(4):329–340.

Veblen TT, FM Schlegel. 1982. Reseña ecológica de los bosques del sur de Chile. *Bosque* 4(2):73–115.

Veblen TT, FM Schlegel, B Escobar. 1980. Structure and dynamics of old-growth *Nothofagus* forests in the Valdivian Andes, Chile. *Journal of Ecology* 68(1):1–31.

Vita A. 1974. Algunos antecedentes para la silvicultura del raulí. Boletín Técnico No. 28, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 17 p.

von Gadow K, G Hui. 1999. Modelling Forest Development. Gottingen, Germany. Cuvillier Verlag. 211 p.

Wadsworth RK. 1976. Aspectos ecológicos y crecimiento del raulí (*Nothofagus alpina*) y sus asociados en bosques de segundo crecimiento de las provincias de Bío-Bío, Malleco y Cautín–Chile. Boletín Técnico No. 37, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 47 p.

Wiegand T, KA Moloney. 2014. Handbook of Spatial Point-pattern Analysis in Ecology. Chapman and Hall/CRC. 538 p.

Yang RC, A Kozak, JH Smith. 1978. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves. *Canadian Journal of Forest Research* 8(2):424–431.

Zohrer F. 1987. Forstinventur. Hamburg und Berlin, Germany. Ein Leitfaden fur Studium und Praxis. Pareys Studientexte 26. Verlag Paul Parey. 207 p.