

Capítulo 6

Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte

Biometrics of natural forests of Chile: the state of the art

CHRISTIAN SALAS ELJATIB Y PEDRO REAL HERMOSILLA

RESUMEN

La biometría forestal ofrece herramientas cuantitativas de apoyo para el manejo e investigación científica de ecosistemas forestales. Aunque en Chile se ha avanzado de manera importante en diversos estudios ecológicos en bosques naturales, existen pocos modelos cuantitativos para el manejo silvicultural de estos. En el presente trabajo se revisan y analizan los principales estudios científicos-técnicos de biometría forestal realizados en bosques naturales. Este análisis se segrega de acuerdo a las siguientes principales divisiones de la biometría forestal: (a) muestreo, (b) modelos estáticos y (c) modelos dinámicos. El desarrollo de la biometría de los bosques nativos ha estado indudablemente relacionado con el avance tecnológico (e.g., computacional, sensores remotos) y nuevas metodologías estadísticas. Los primeros estudios hacían referencia a estudios relacionados principalmente con muestreo (los denominados inventarios forestales) y modelos estáticos (de volumen y altura-diámetro), para pasar paulatinamente a modelos de tipo dinámico (crecimiento). Para cada una de estas divisiones hay aplicaciones básicas, ya que son fundamentales para la caracterización de bosques y planificación de actividades silvícolas. Sin embargo, dichas aplicaciones poseen una serie de deficiencias, dentro de las cuales destacan: son desarrolladas en zonas geográficas reducidas y situaciones específicas; han sido preparadas con una base muestral reducida; y carecen de análisis del comportamiento de los modelos ajustados. Finalmente, se proponen algunas alternativas para organizar el trabajo de investigadores en biometría que en conjunto con silvicultores puedan finalmente contribuir a generar modelos cuantitativos de mayor validez estadística, biológica y práctica.

Palabras clave: modelación ecológica, muestreo, productividad de sitios, modelos de crecimiento.

SUMMARY

Forest biometrics offers quantitative tools for supporting management and research of forest ecosystems on issues ranging from a single-tree to the globe. Although Chile has developed several ecological studies of natural forests, there are few quantitative models available. We review and analyze the main scientific-technical studies on forest biometrics developed for natural forests. The analysis is presented in the following divisions of forest biometrics: (a) sampling, (b) static models, and (c) dynamic models. Biometrics of natural forests has been clearly related to the advances of technology (e.g., computing, remote sensing) and new statistical methodologies. The first studies deal with sampling (often referred to as forest inventory) and static models (e.g., of volume and height-diameter), and more recently moving towards dynamic models (e.g., of growth). There are basic applications for each of the aforementioned divisions, because they are required for most forest characterization and silvicultural planning. Nevertheless, most of those applications have several pitfalls, such as limited geographic or ecological range, limited supporting empirical data, and minimal analysis of the behavior of the fitted model. Finally, we propose some alternatives for biometricians who aim to generate more practical, statistically sound, and biologically realistic quantitative models.

Key words: ecological modelling, sampling, static models, growth models.

6.1 Introducción

Aunque el manejo forestal de bosques naturales (13,4 millones de ha) en Chile se aplica a bastante menor escala que el aplicado en plantaciones forestales (2,5 millones de ha) [*Pinus radiata* D. Don, *Eucalyptus globulus* Labill, *E. nitens* (Deane & Maiden)], la posibilidad de su aplicación resulta promisoría, dado su gran potencialidad en términos de superficie, disponibilidad e impacto social. El manejo de bosques naturales se ha concentrado en bosques de segundo crecimiento, mostrándose las especies roble, raulí y coigüe de alto potencial para plantaciones forestales (Espinosa *et al.* 1988, Wienstroer *et al.* 2003, Cubbage *et al.* 2007, Hildebrandt *et al.* 2010). La investigación silvícola en bosques naturales se concentra en los siguientes tipos de bosques de segundo crecimiento (renovales): roble-raulí-coigüe (Puente *et al.* 1979, 1981, Grosse 1989, Grosse y Cubillos 1991, Donoso *et al.* 1993a, Grosse y Quiroz 1999, Lara *et al.* 1999); bosques de *N. pumilio* (lenga) (Uriarte y Grosse 1991, Schmidt y Caldente y 1994, Rosenfeld *et al.* 2006); y tipo forestal siempreverde (Donoso 1989a, 1989b, Donoso *et al.* 1999a, Navarro *et al.* 1999).

A pesar de la importancia de los bosques naturales de Chile, falta información cuantitativa sobre estos. La importancia ecológica y ambiental de los bosques templados de Chile es ampliamente reconocida en la comunidad científica (Davis *et al.* 1994, Wilcox 1995, Olson y Dinerstein 1998, Stattersfield *et al.* 1998). Variados estudios ecológicos se han llevado a cabo en estos bosques, dentro de los cuales podemos destacar los siguientes sobre su: dinámica forestal (Veblen y Ashton 1978, Puente *et al.* 1979, Veblen *et al.* 1980, 1981, Veblen y Donoso 1987, Armesto *et al.* 1992, Innes 1992, Donoso 1995, Veblen *et al.* 1996); autoecología (Donoso 2006a); genética (Donoso 1979, Donoso y Landrum 1979, Donoso 1987, Donoso *et al.* 1990, 2004); dendrocronología (Lara y Villalba 1993, Lara *et al.* 2001, Pollmann 2003, González 2005, Quesne *et al.* 2006, Christie *et al.* 2009); regeneración (Burschel *et al.* 1976, Veblen *et al.* 1978, 1979, Winberger y Ramírez 1999, González *et al.* 2002); edafología (Schlatter 1994, Gerding y Thiers 2002, Thiers y Gerding 2007, Klein *et al.* 2008); y viverización y plantaciones Donoso *et al.* 1999b, Grosse y Quiroz 1999, Donoso *et al.* 2007a). Sin embargo, información cuantitativa de variables de estado de rodal, así como de crecimiento no se encuentra fácilmente disponible. Existen entonces pocos modelos cuantitativos que ayuden la toma de decisiones de manejo e investigación de bosques naturales. Esta falta de información cuantitativa ha sido también observada para otros tipos de bosques en Chile, tales como los de segundo crecimiento y adultos de roble (*Nothofagus obliqua*), raulí (*Nothofagus alpina*), y coigüe (*Nothofagus dombeyi*), por Trincado *et al.* (2002), Salas y García (2006) y Salas *et al.* (2006), respectivamente; y para bosques de araucaria (*Araucaria araucana*) por Salas *et al.* (2010).

6.2 Biometría e importancia de la modelación

La biometría corresponde a una disciplina científica que promueve el desarrollo y aplicación de teoría y métodos estadísticos y matemáticos en las bio-ciencias, incluyendo a las ciencias forestales y ambientales, agricultura, ecología, y disciplinas aplicadas. Por convención y dado su gran avance, la bioestadística corresponde al símil de biometría pero circunscrito a las ciencias de la salud humana. Tal como la Sociedad Internacional de Biometría lo destaca, recientemente el término “Biometría” se ha empleado para referirse al campo emergente tecnológico que se dedica a la identificación de individuos basados en caracteres biológicos, tales como los basados en escaneo de retinas y huellas digitales. Sin embargo, la biometría a la cual se refiere el presente capítulo no está relacionada a este tipo de tecnologías, y se centra en la biometría forestal de los bosques naturales de Chile.

La biometría forestal comprende el uso de modelación estadística y matemática para la evaluación y análisis cuantitativo de recursos forestales, siendo vital para una serie de investigaciones. Una aplicación clásica de la biometría en manejo forestal

corresponde a la cuantificación del volumen de madera que posee un bosque. Dicha tarea, aunque relativamente simple en el papel, implica el desarrollo de una serie de mediciones en terreno, así como de una estrategia de muestreo y empleo de modelos dendrométricos. Sin embargo, la biometría también sirve para evaluar variables que no tan sólo son de importancia desde el punto de vista maderero. Entre ellas podemos destacar la estimación de la biomasa y carbono de los ecosistemas forestales, un área de investigación de vital importancia en el contexto de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Otro tipo de investigación biométrica de importancia corresponde a la evaluación de sitios forestales, en donde se evalúa el potencial del sitio para el crecimiento de una especie determinada, al unir aspectos de autoecología de la especie, información cuantitativa, y modelación. Esta evaluación de sitios no tan sólo es clave para planificar el establecimiento de nuevos bosques sino que para llevar a cabo planes de restauración ecológica. Otra aplicación vital de la biometría en las ciencias forestales corresponde a la modelación del crecimiento de árboles y rodales, siendo quizás ésta la de mayor complejidad de llevar a cabo. Los modelos de crecimiento son claves para la planificación del manejo forestal, así como para representar la dinámica de bosques.

La modelación ofrece un marco teórico apropiado para investigación, aunque su importancia no ha sido siempre reconocida en investigación de los bosques naturales. Es importante en este punto destacar lo mencionado por Salas (2008), en cuanto a que mayoritariamente la estadística que se emplea en investigación científica es efectivamente sobre modelos estadísticos y no sobre “métodos estadísticos”, como normalmente se menciona, o se asume comprender, respecto a estadística en ciencia. Al emplear la clasificación de tipos de investigaciones científicas (Hernández *et al.* 1991), se puede decir con respecto a la investigación en bosques naturales, que existe una gran cantidad de estudios exploratorios y descriptivos, sin embargo, una menor cantidad de estudios correlacionales, y sobre todo muy pocos estudios explicativos que buscan revelar las causas de los fenómenos en estudio. Dentro de éstos últimos la modelación juega un rol fundamental (Bossel 1991, Zeide 1991, Landsberg 2003), aunque no siempre se reconozca como tal. Desafortunadamente, la modelación en investigación de bosques naturales ha tenido una baja popularidad. Es importante mencionar también, que por modelación no nos referimos simplemente a ajustar un modelo de regresión lineal, no lineal, o logística¹, sino que el planteamiento de modelos sea el conductor para revelar relaciones y comportamiento de un sistema que representa un fenómeno en estudio, empleando entonces el modelo como una hipótesis. En este sentido, es posible diferenciar entre los alcances de distintos tipos de estudio, entre ellos: (a) los estudios de campo tienen realismo, (b) los estudios de laboratorio tienen control y precisión, mientras que (c) la modelación tiene

¹ Ajustar un modelo de estos en cualquier *software* estadístico no representa mayor complejidad.

generalidad. Los modelos permiten generalizaciones y robustecer teorías. Tampoco se debe ir al extremo, puesto que un modelo es una simplificación de la realidad. Basado en lo anteriormente expuesto, se puede visualizar que la modelación es compleja, y existe una serie de problemas y preguntas que aparecen en cualquier trabajo de modelación, y como muestra de lo amplio (y complejo) de ella, se transcribe una frase de Albert Einstein: “Todo debiera ser tan simple como lo es, pero no más simple”, y del Profesor G.E.P. Box “Todos los modelos son incorrectos, pero algunos son útiles”. En los trabajos de: Schumacher (1945), Burkhart y Gregoire (1994), Gregoire y Köhl (2000), Gregoire (2001, 2004), Rennolls *et al.* (2007), y Temesgen *et al.* (2007) se pueden encontrar mayores detalles sobre la importancia de la biometría en las ciencias forestales.

Este trabajo se centra en revisar y analizar los principales estudios científicos-técnicos de biometría forestal realizados en bosques naturales de Chile. De acuerdo al conocimiento de los autores, este correspondería al primer trabajo de este tipo realizado en Chile. El análisis se presenta y segrega de acuerdo a las principales divisiones de la biometría forestal: (a) muestreo, (b) modelos estáticos y (c) modelos dinámicos. Los estudios revisados corresponden a publicaciones científicas, aquellos que han sido sometidos a evaluación de pares externos, aunque en algunos casos muy puntuales, y en donde no existen publicaciones científicas, se hace mención a otro tipo de estudios, como tesis e informes de proyectos.

6.3 Muestreo

Debido a la extensa superficie e imposibilidad de realizar un censo de árboles en términos operativos, la estimación de parámetros² poblacionales de diferentes variables de estado de bosques se ha realizado mediante la aplicación de estrategias de muestreo y uso de diferentes estimadores. Los muestreos forestales, o mal llamados “inventarios forestales” son conducidos con el uso de métodos de muestreo probabilísticos, los cuales van desde una selección al azar de ubicación de unidades de muestreo (parcelas) a diseños de multietapas y multifases haciendo uso de información auxiliar. La aproximación al tema de inventario forestal que dan los textos fundacionales de Loetsch *et al.* (1964) y Zöhrer (1987) tienen una gran influencia en el tratado de este tópico en la biometría forestal de Chile. Esto puede estar explicado por la formación de postgrado de los profesores Dr. Fernando Cox y

² Es vital entender que en estadística un parámetro está bien definido y no corresponde al uso coloquial de la palabra parámetro, como “referencia” o peor aun como variable. Por el contrario, un parámetro es una constante que representa a una población, e.g., el total de biomasa que tiene un bosque en un momento determinado de su desarrollo, y se denota con letras griegas, e.g., τ o μ para el total y la media, respectivamente.

Dr. Roland Peters y, quienes son sin duda los padres de la biometría forestal Chilena³, quienes obtuvieron sus doctorados en las Universidades de Göttingen y Freiburg (ambas en Alemania), respectivamente. Ese conocimiento quedó plasmado en un gran capítulo del libro “Mensura Forestal” de Prodan *et al.* (1997). También existe influencia de la escuela Norteamericana, y en este contexto es necesario destacar al Dr. Bertram Husch, quien participó activamente en la enseñanza de la Biometría en la Universidad de Chile, en la creación del Instituto Forestal (INFOR) Chileno y en los inventarios y cartografía de plantaciones y Bosque Nativo desarrollados por INFOR en la década del 60. Una mayor revisión de los aportes de la escuela norteamericana a inventario forestales es expuesta en Frayer y Furnival (1999).

Aunque existen una serie de aplicaciones con inventarios forestales en Chile, el trabajo científico sobre estos no ha sido muy prolífero. Cox (1976) propuso una metodología para conducir inventarios de bosques naturales, abordando diversos aspectos generales necesarios para estos fines, tales como el diseño de muestreo y estimación de volumen de productos. Este trabajo fue de carácter general, sin embargo, entregó las bases metodológicas que enmarcan a cualquier inventario de bosques naturales. Corvalán (1980) fue el primero en aplicar conceptos básicos de optimización en el contexto de inventarios forestales de bosques naturales en Chile. Dicho autor buscó responder a la pregunta: ¿Cuál es la superficie óptima de una unidad de muestreo?, para lo cual Corvalán consideró aspectos de estimación (variabilidad) y de tipo económicos (el tiempo de desplazamiento) formulando un modelo de tiempo total de operación en terreno que fue optimizado para determinar la superficie de parcelas. (Corvalán 1980) aplicó su modelo a datos provenientes de un muestreo sistemático en un bosque de coigüe y raulí en Panguipulli. De todas maneras, a pesar de este primer estudio pionero, no se han desarrollado mayores estudios (salvo el de Sandoval 1993), en bosques nativos que incluyan optimización en inventarios forestales, tales como el trabajo fundacional de Zeide (1980) y el reciente de Gilabert y McDill (2010) en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. Por otra parte, Bahamóndez (1994) empleando la distribución de frecuencias de cuentas digitales de fotografías aéreas de un área de interés, propuso una metodología para la localización de parcelas de muestreo. En el contexto de inventarios de gran escala Bahamóndez y Martín (1995) estimaron, mediante la aplicación de variogramas, la distancia óptima de la grilla de muestreo sistemática a utilizar en un inventario nacional forestal.

El uso de información auxiliar en inventarios forestales ha cobrado mayor importancia debido a avances tecnológicos recientes. Existe información que se puede obtener más fácilmente que aquella que se obtiene por trabajo directo en terreno, e.g.,

³ Posteriormente secundados por el Dr. Pedro Real, el prof. Patricio Corvalán, y el Dr. Víctor Sandoval.

aquella derivada desde sensores remotos, la cual se tiende a denominar información auxiliar. Existen alternativas estadísticas y matemáticas que permiten emplear información auxiliar en la estimación de variables a nivel de árboles o bosques. El primer trabajo de este tipo en bosques naturales de Chile, fue el de Sandoval (1993), quien evaluó la aplicación de muestreo bietápico-bifásico en bosques siempreverdes, al compararlos con muestreo bietápico, (Shiue y John 1962) y bifásico (Mac Lean 1963). En el muestreo bietápico, se seleccionaron unidades primarias y dentro de estas se seleccionaron unidades secundarias, mientras que en el bifásico, en una primera fase se miden parcelas fotogramétricas y en una segunda fase, se selecciona y mide una submuestra de ellas en terreno. Sandoval, también consideró optimización del tamaño muestral, encontrando buenos resultados con el muestreo bietápico-bifásico. Con el correr del tiempo, las fotografías aéreas han sido desplazadas para la obtención de información auxiliar, por sensores remotos (Tomppo 1991). Es así como se pueden mencionar los siguientes estudios: Mery y Bahamóndez (1996) aplican un muestreo en dos fases con apoyo de imágenes satelitales en la Reserva Forestal Malleco; Bahamóndez y Martin (2004) aplican el esquema de inventario multifuente entre las regiones de la Araucanía a los Lagos aplicando el método del k -NN (*sensu* Reese *et al.* 2002); y Bahamóndez *et al.* (2007) empleando información auxiliar obtenida desde imágenes Landsat y conglomerados de unidades de muestreo, establecieron un sistema de estimación de variables de estado de rodal empleando el método del k -NN para bosques de *Fitzroya cupressoides* (alerce). Ahora bien, Salas *et al.* (2010) compararon diferentes alternativas estadísticas paramétricas y no-paramétricas empleando información derivada de *Landsat* en bosques de *Araucaria araucana* (araucaria) para la imputación de variables de estado de rodal, y discutiendo las ventajas y diferencias entre cada uno de estas diferentes alternativas de estimación, que son especialmente aplicables en el contexto de inventarios al emplear información auxiliar.

6.4 Inventario forestal continuo

Un inventario forestal continuo (IFC) es clave para el monitoreo de los ecosistemas forestales. En un IFC todos los árboles sobre un diámetro mínimo dentro de una unidad de muestreo son marcados y medidos en sucesivas ocasiones en el tiempo (van Laar y Akça 2007). Las unidades de muestreo son establecidas en el marco de un diseño de muestreo. Donoso y Otero (2005) analizaron si es apropiado clasificar a Chile como un país forestal al aplicar diferentes criterios empleados internacionalmente. En el presente trabajo se cree además que la existencia de un IFC es también un aspecto que caracteriza a un país forestal. Por ejemplo, en USA el programa “*Forest Inventory and Analysis National Program*” (FIA), que es manejado por el Servicio Forestal en cooperación con el Sistema de Bosques privados y de

los estados, se encarga del monitoreo permanente del crecimiento de los distintos tipos de formaciones boscosas, y fue iniciado por una ley de investigación forestal de 1928. El FIA ofrece una gran variedad de reportes, gráficos, y boletines, y además datos ampliamente disponibles.

Han existido diversos intentos para establecer un sistema de inventario forestal continuo en Chile, los cuales han sido resumidos por INFOR (2009) y se describen brevemente a continuación. Un importante esfuerzo pionero en este tema lo hizo la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) en 1944–45 al financiar en cooperación con el *U.S. Forest Service* (de Estados Unidos) el proyecto “*Forest resources of Chile, as a basis for industrial expansion*”, también conocido como Misión Haig. El inventario realizado fue el primero en su clase en Chile y Latinoamérica, y fue el primero en utilizar material fotográfico aéreo en este tipo de actividad. Cox (1980) realizó una propuesta metodológica detallada de un sistema de inventario continuo de bosque nativo para Chile, en el marco de un estudio para el PNUD. Cox (1980) planteó un diseño de IFC, en un sistema de dos fases, con unidades muestrales rectangulares de 20 x 50 m. Lamentablemente, el sistema no se implementó. Durante 1991, el INFOR postuló un proyecto de IFC al programa de financiamiento técnico FONDEF de Chile, sin embargo, el proyecto no fue adjudicado. Nuevamente INFOR en 1995, con la colaboración del METLA (Finlandia) y el *British Columbia Ministry of Forestry* (Canadá) postuló a financiamiento a CORFO, el cual tampoco fue aceptado. En el marco del catastro de bosque nativo (CONAF/CONAMA/BIRF 1999), finalizado en 1999, se ejecutó un inventario extensivo, el cual tuvo como objetivo el estimar las existencias a nivel de país de los recursos forestales nativos y servir de base para el establecimiento de un IFC en Chile. Este inventario fue ejecutado por la Universidad Austral de Chile (UACH), y sus resultados no han sido difundidos al público. El inventario tuvo una serie de problemas, entre ellos la localización de parcelas en terreno fue el mayor obstáculo que debió enfrentar este proyecto⁴.

Recientemente se ha establecido un IFC de bosques naturales en Chile, en el que INFOR ha completado el primer ciclo (2001-2010) de un sistema de inventario continuo de ecosistemas forestales en Chile localizados entre la región del Libertador Bernardo O’Higgins y la de Magallanes y la Antártica Chilena. Es un inventario continuo con reemplazo parcial, multifuente, multinivel y multirecurso, bajo diseño muestral con indicadores estadísticos y mecanismos de control de calidad, y tiene una orientación a medir variables a nivel de ecosistemas, lo cual involucra toda la vegetación existente, y con mediciones edáficas y registro de fauna, y líquenes, entre otras variables. Cada punto de muestreo es un conglomerado conformado por tres parcelas concéntricas circulares, siendo la mayor aquella de 500 m² (Martin 2009).

⁴ Comunicación personal con Carlos Bahamóndez, encargado de Inventario del INFOR.

Si bien este IFC del INFOR ha comenzado en el 2001, su difusión al público ha sido deficiente, así como también la distribución de los datos. Se espera que se fortalezca al aplicar nuevas ideas. Una característica reciente que ha implementado el INFOR, y que se considera muy importante corresponde a que sus datos se encuentran disponibles mediante un procedimiento especificado en un sitio web⁵ destinada para esos fines.

6.5 Muestreo de variables no tradicionales

El muestreo de variables no madereras (e.g., follaje, raíces) ha sido considerado levemente hasta ahora. Existe un reconocimiento de la importancia de los productos forestales no madereros (PFNM) (Campos 1998, Catalán 2000, Tacón 2004, Tacón *et al.* 2006), sin embargo, se debe trabajar fuertemente en la estandarización de su medición. Existen pocos estudios publicados al respecto, salvo el de Nahuelhual *et al.* (2008). Desde el punto de vista estadístico, ya existe una base de literatura especializada en muestreo probabilístico en recursos naturales (Gregoire y Valentine 2008), e incluso aplicaciones en PFNM (Scheuber y Köhl 2003, Kangas 2006, Maltamo 2006). Así también hay estudios sobre material leñoso muerto *Coarse woody debris* (CWD) en Chile, aunque escasos, e.g., Schlegel y Donoso (2008).

6.6 Modelos estáticos

6.6.1 A nivel de árbol individual

Modelos de altura-diámetro. Los modelos de altura-diámetro son claves en muestreos forestales. En muestreo forestal convencional, i.e., mediciones en terreno de variables de árboles individuales dentro de unidades de muestreo (parcelas), tales como diámetro a la altura del pecho (d) se mide para todos los árboles dentro de la parcela, mientras que la altura total (h) es medida sólo en una submuestra de árboles, porque h es más difícil y costosa de medir. En este contexto, modelos que predicen h como una función de d (referidos de aquí en adelante como modelos de altura-diámetro, o modelos $h-d$) se ajustan para predecir h en aquellos árboles con sólo mediciones de d . En base a la altura, posteriormente se estima el volumen (mediante un modelo de volumen o bien modelo de ahusamiento), ya que dichos modelos emplean como variables predictoras al d y h . Es por todo lo anterior que existe una necesidad en cualquier caracterización de bosques por emplear modelos $h-d$, ya sean previamente ajustados o serán ajustados en base a la submuestra medida.

Si bien la modelación de la relación altura-diámetro ha sido estudiada desde los principios de la biometría forestal moderna (Thorey 1932, Meyer 1940, Curtis 1967),

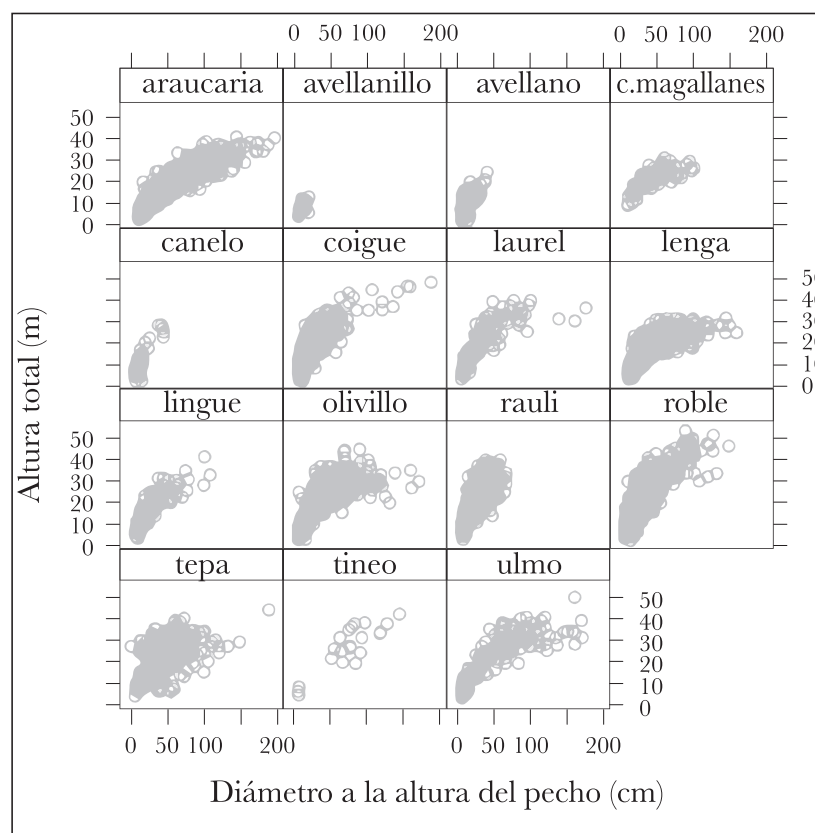
⁵ INFOR 2012. <http://mapaforestal.infor.cl>

existe aún un gran cuerpo de literatura en este tema empleando diferentes estrategias de modelación (Lappi y Bailey 1988, Staudhammer y LeMay 2000, Robinson y Wykoff 2004), demostrando la complejidad e importancia de este tipo de modelos alométricos. Diversas formas funcionales para la relación $h-d$ han sido propuestas y evaluados, y en la mayoría de los textos de mensura forestal se pueden encontrar un listado de ellos (Avery y Burkhart 2002, Husch *et al.* 2003, van Laar y Akça 2007).

En el caso de los bosques naturales de Chile, todos los estudios que han involucrado caracterización silvícola han empleado algún modelo $h-d$, sin embargo, no existe un mayor análisis de estos modelos, por ejemplo, no se comparan mayormente diferentes formas funcionales. Empleando datos de $h-d$ provenientes de distintas fuentes (entre otras Núñez y Salas 2000, Mujica 2001, Donoso 2002, Salas 2002, Pedraza 2003, Salas 2011) y sitios geográficos y condiciones de diversas especies, se observa una marcada diferencia entre especies en la relación $h-d$ (figura 1), ya sea en la curvatura de la relación, en el rango de la variable predictora, así como en el nivel máximo de altura.

A continuación se muestran las formas funcionales de modelos de $h-d$ comúnmente empleados en caracterizaciones silvícolas de bosques naturales (Peters 1971, Puente *et al.* 1979, Núñez y Peñaloza 1986, Lahsen 2003).

Figura 1. Relación altura total y diámetro a la altura del pecho para diferentes especies. Cada punto corresponde a un árbol medido en terreno. Los datos provienen de diferentes fuentes.



$$h_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \varepsilon_i ; \quad [1]$$

$$\ln h_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d_i + \varepsilon_i ; \quad [2]$$

$$h_i = \beta_0 + \beta_1 e^{-0.5d_i} + \varepsilon_i ; \quad [3]$$

$$h_i = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{d_i} + \varepsilon_i ; \quad [4]$$

donde,

h_i es altura total para el i -ésimo árbol, d_i es el diámetro a la altura del pecho para el i -ésimo árbol, y ε_i es el error aleatorio del modelo asociado al i -ésimo árbol; mientras que β_0 y β_1 son parámetros a ser estimados.

Se debe tender a preferir emplear modelos del tipo similar al 4 (denominado inverso) pues su comportamiento biológico es más consistente con la real alometría de los árboles. En la actualidad, existe una tendencia a preferir modelos no-lineales producto de su comportamiento biológico, un ejemplo de estos son los propuestos por Meyer (1940) y Stage (1963), como se detallan a continuación, respectivamente.

$$h_i = 1,3 + \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 d_i}) + \varepsilon_i ; \quad [5]$$

$$h_i = 1,3 + \beta_0 (d_i^{\beta_1}) + \varepsilon_i \quad [6]$$

Empleando datos provenientes del predio Rucamanque (Salas 2002) se ajustaron ambos modelos mediante el método de los mínimos cuadrados y empleando algoritmos de optimización implementados en el software libre estadístico R (R Development Core Team 2011), y se seleccionó el modelo de Stage (ecuación 6) para diferentes especies o grupos de especies. Nótese que los datos provienen de un bosque adulto que sería clasificado como un remanente original del tipo forestal roble-raulí-coigüe según la clasificación de Donoso (1981). La relación altura-diámetro de acuerdo al ajuste de este modelo muestra una clara diferencia alométrica entre las especies (figura 2), donde roble alcanza mayores alturas máximas mayores que las del resto de las especies. Luego las alturas máximas son alcanzadas por ulmo y tino lo cual también es consistente con la autoecología de las especies, y es fácilmente observado en este tipo de bosques multietáneos, mientras que olivillo y laurel, lingue, y tepa alcanzan alturas máximas similares.

Desde el punto de vista de la estimación de existencias (i.e., volumen), es necesario considerar que mayoritariamente las especies latifoliadas del bosque chileno no tienen un fuste excurrente como el de las coníferas, si no que en algún

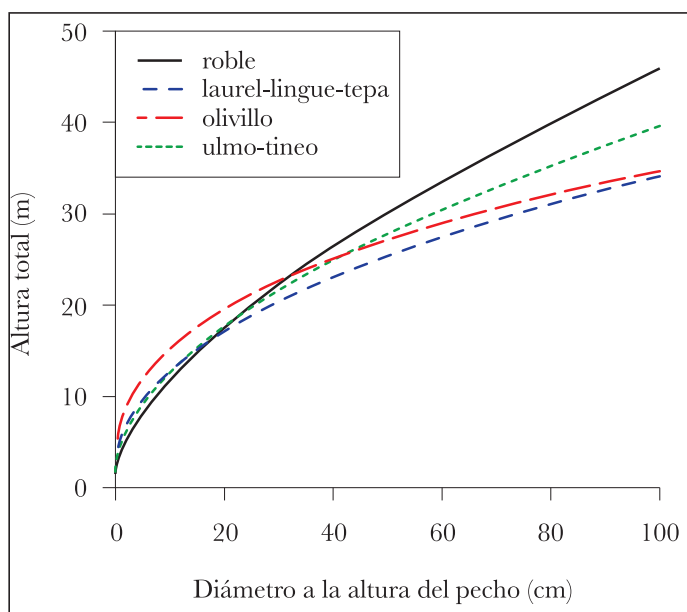


Figura 2. Relación altura total y diámetro a la altura del pecho para algunas especies creciendo en un bosque multietáneo en Rucamanque (región de la Araucanía). Las curvas provienen del ajuste del modelo 6.

punto, éste pierde su eje de crecimiento ramificándose por lo que la altura total en muchos casos no es un buen descriptor de su verdadero potencial, siendo la altura hasta la base de la copa una mejor variable. Esta situación es muy evidente en bosques adultos, donde todos los árboles adultos presentan esta característica que justifica estudiar con mayor profundidad esta situación (Real 1977). Esta característica tiene consecuencias en otros modelos tales como volumen y ahusamiento en los cuales debe realizarse una clara distinción entre la dendrometría de árboles adultos y renovales, así como también entre la estimación de volumen bruto y neto.

Modelos de volumen y ahusamiento. Los modelos de volumen son vitales en cualquier evaluación económica del recurso forestal, y por ende existen una serie de modelos disponibles, los cuales han sido recopilados en diversas instancias (Ferreira 1973, Drake *et al.* 2003). No obstante dichas recopilaciones denotan una serie de deficiencias que podrían resumirse en que muchos modelos son erróneamente reportados (errores en los coeficientes reportados) y la gran mayoría no presenta información estadística del ajuste de los modelos tales como el rango de ajuste en diámetro, altura y volumen. Una gran parte de esas recopilaciones son basadas en modelos que no han sido publicados.

A continuación se mencionan una serie de modelos para diferentes especies que han sido mayoritariamente publicados en revistas científicas. Dentro de estos se encuentran modelos para lenga (Fuenzalida 1975, Corvalán 1987, Núñez y Salas 2000); raulí (Puente *et al.* 1981, Cubillos 1988b); coigüe (Cubillos 1988a); lingue y mañío (Santelices 1989); roble y hualo (Higuera 1994, Salas 2002); canelo (Corvalán *et al.* 1987b, Quiróz 1990); araucaria (Corvalán 1998). Así también podemos destacar

otros estudios que han abordado la problemática de agrupar especies debido a que participan en bosques multiespecíficos, dentro de los cuales se pueden destacar a los estudios de Vallejos (1976), Kawas (1978) y (Salas 2002) para roble, olivillo, laurel, lingue, tepa y tineo.

A continuación se muestran las formas funcionales de modelos de volumen comúnmente empleados para especies nativas (Kawas 1978, Puente *et al.* 1979, Salas 2002).

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 h_i + \varepsilon_i ; \quad [7]$$

$$\ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d_i^2 h_i + \varepsilon_i ; \quad [8]$$

$$\ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln d_{6i} h_i + \beta_2 \ln h_i + \beta_3 \ln d_i^2 h_i + \varepsilon_i ; [9]$$

donde,

v_i es volumen bruto total para el i -ésimo árbol, en m^3 scc; d_{6i} es el diámetro con corteza del fuste a los 6 metros de altura en el i -ésimo árbol, en cm; y las otras variables y parámetros fueron previamente definidos.

Aunque existen modelos de volumen para una gran variedad de especies, hay pocos estudios que se centren en analizar las diferencias entre especies. A modo de ejemplo, se graficó los modelos de volumen bruto⁶ individual especie–específicos propuestos por Salas (2002). La estimación se realiza por especie, y en el caso de ulmo también se segrega de acuerdo a un valor de d . Basado en los análisis realizados por Salas (2002) se propuso emplear un mismo modelo para laurel, lingue y tepa. Los modelos de volumen anteriores se recomiendan para ser empleados para árboles con un $d > 10$ cm. Al emplear modelos complementarios de h - d y aquellos que permiten estimar el d_6 , y así graficar la curva de volumen en función exclusivamente del diámetro, se puede observar una marcada diferencia en los niveles de volumen que alcanzan las especies dependiendo de su diámetro (figura 3).

Para estimar el volumen de otras especies que no poseen modelos confiables o para árboles con $d < 10$ cm, se recomienda emplear la siguiente expresión simple que asume un factor de forma artificial (Prodan *et al.* 1997) de 0.3, como sigue

$$\hat{v}_i = 0.00007854 (d_i^2 h_i) 0.3 ; \quad [10]$$

⁶Volumen bruto desde la base del árbol hasta la altura comienzo de copa más el volumen de la copa. Este volumen se mide con corteza y no considera ningún tipo de descuento por defectos.

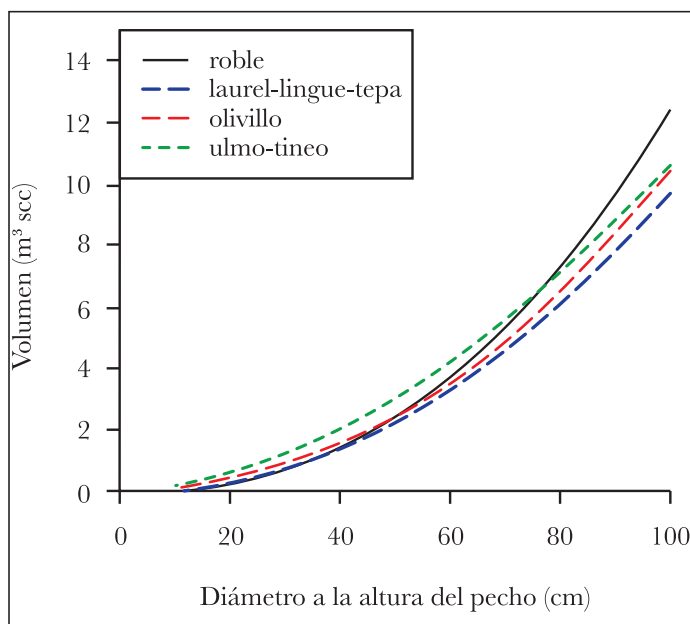


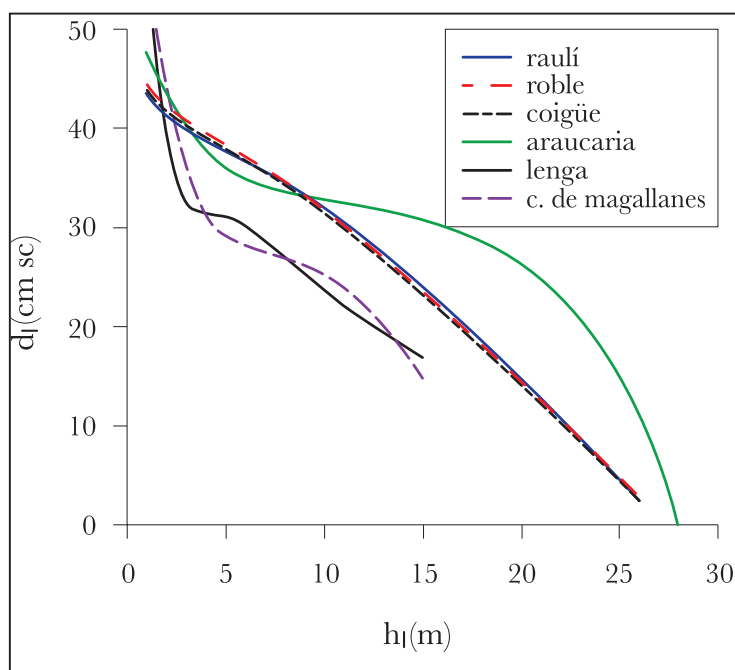
Figura 3. Relación volumen bruto total y diámetro a la altura del pecho para algunas especies creciendo en un bosque multietáneo en Rucamanque (región de la Araucanía). Las curvas provienen de los modelos propuestos por Salas (2002).

Modelos de ahusamiento. Los modelos de ahusamiento no han sido tan estudiados como las funciones de volumen para las especies nativas. Aunque es ampliamente reconocido la utilidad de los modelos de ahusamiento para no tan sólo la predicción del diámetro del fuste a una altura sobre el suelo (d_i) sino que también estimar el volumen entre secciones y total, y además encontrar alturas fustales para respectivos d_i (Prodan *et al.* 1997), no existe una gran cantidad de estudios al respecto para especies nativas. Quizás entre los primeros trabajos de modelación del perfil de un árbol de especies nativas fue el conducido por Peters (1971) en araucaria ajustando un modelo polinomial de quinto grado. Carrasco (1986) desarrollo un completo estudio del ahusamiento de especies nativas del bosque valdiviano, ajustando modelos sencillos a diferentes especies, pero además incorporando la evaluación de la calidad de las secciones. Posteriormente, Kahler (1993), seleccionó el modelo trigonométrico propuesto por Thomas y Parresol (1991) para representar el ahusamiento de roble y raulí en la reserva Malleco. Higuera (1994) ajustó y comparó modelos de volumen y de ahusamiento para roble y hualo, realizando un detallado trabajo de evaluación de modelos, y modificaciones de modelos de ahusamiento desarrollados originalmente para coníferas para que fueran más apropiados. Trincado y Vidal (1999) y Gonzalez (2006) aplicaron interpolación “spline” para representar el ahusamiento de lenga y roble-raulí, respectivamente, sin embargo, aunque esta técnica se ve interesante en procesos computacionales intensivos, es un método numérico los cuales mayoritariamente desconocen la naturaleza estocástica del ahusamiento o de cualquier variable a nivel de árbol. Empleando una extensa base de datos para lenga y *Nothofagus betuloides* (coigüe de Magallanes), Núñez y Salas

(2000) realizan un detallado estudio sobre modelos fustales y de volumen, modelando el diámetro fustal sólo hasta la altura comienzo de copa y por lo tanto estimando a ese punto el diámetro en el fuste a la altura comienzo de copa. En general todos los estudios previos presentaban uno de los siguientes problemas: ocupan datos provenientes de un área geográfica reducida o bien poseían un bajo tamaño muestral. Sin embargo, Gezán *et al.* (2009) resolvieron los problemas anteriores, al emplear una extensa base de datos para roble, raulí, y coigüe provenientes del centro-sur de Chile. Gezán *et al.* (2009) ajustaron de modelos de ahusamiento para cada una de dichas especies. Aunque el estudio no presenta un exhaustivo análisis estadístico, si abordó la evaluación de si era pertinente tener un modelo global para cada especie o se debieran ajustar modelos para condiciones locales para cada especie. En figura 4 se grafica el ahusamiento de roble, raulí, y coigüe empleando los modelos propuestos por Gezán *et al.* (2009) para un árbol de referencia que tiene 45 cm de d y 27 m de altura total. Además se grafica el ahusamiento para un árbol de las mismas dimensiones de araucaria empleando el modelo ajustado por Peters (1971), y para lenga y coigüe de Magallanes empleando el modelo ajustado por Núñez y Salas (2000).

Se puede observar que de acuerdo a los modelos propuestos para roble, raulí, y coigüe no existen mayores diferencias en la forma de los árboles de estas especies. Por otra parte, lenga y coigüe de Magallanes poseen un ahusamiento distinto entre ellas y al resto de las especies. El ahusamiento descrito para araucaria parece requerir una mayor revisión ya que describe a un árbol más cilíndrico que para el resto. El gráfico anterior demuestra ciertas falencias en la modelación del ahusamiento de algunas especies, o al menos una mayor revisión de los modelos propuestos.

Figura 4. Ahusamiento para algunas especies de acuerdo a modelos propuestos en la literatura para un árbol de referencia que tiene un diámetro a la altura del pecho de 45 cm y una altura total de 27 m. Las curvas provienen del ajuste de distintos modelos, siendo los modelos de roble, raulí, y coigüe ajustados por Gezán *et al.* (2009), el de araucaria por Peters (1971), y el de lenga y coigüe de Magallanes por Núñez y Salas (2000).



Otros modelos. Existen un gran número de modelos que son interesantes, pero acá resumo que dentro de este grupo, la modelación de la biomasa ha tomado cada vez mayor importancia. Prado *et al.* (1986), Quintana (2008) desarrollaron modelos estimadores de la biomasa total y por componente para *Quillaja saponaria* (quillay), mientras que Aguirre e Infante (1988) lo realizaron para boldo y espino, y Bown (1992) para lenga en Magallanes. Otros modelos interesantes son los que a partir de los datos de biomasa, permiten estimar el contenido de carbono (Gayoso y Guerra 2005).

Hay otros modelos dendrométricos que también son interesantes, aquellos de espesor de corteza, y los que modelan el d en función del diámetro de tocón, pero que existen sólo para pocas especies. En este sentido destacan los estudios de Real (1977) y Álvarez y Grosse (1978) donde se ajustaron una serie de modelos biométricos para caracterizar a los bosques de raulí-coigüe y lenga, respectivamente, y por sobretodo el acabado y completo estudio de Corvalán *et al.* (1987a, 1987b) para los bosques de canelo en Chiloé.

6.6.2 A nivel de Rodal

6.6.2.1 Modelos de distribución diamétrica

Funciones de densidad de probabilidad. La modelación de la distribución diamétrica se ha llevado mayoritariamente a cabo mediante el uso de funciones de densidad de probabilidades (fdp). Una fdp es un modelo matemático que describe la distribución de una variable aleatoria, y depende de los valores que la variable tome, así como también de un set de parámetros. Un gran número de fdps han sido evaluadas para modelar la distribución de diámetros de árboles (Bailey y Dell 1973, Rustagi 1978, Burk y Burkhart 1984, Borders *et al.* 1987, Vanclay 1994, van Laar y Akça 1997) Sin embargo, la fdp de Weibull (Weibull 1951) ha sido preferida en un gran número de estudios por su flexibilidad y buen comportamiento.

La construcción de modelos de distribución diamétrica mediante una fdp ha tenido básicamente dos aplicaciones que se ejemplifican a continuación. La primera corresponde a describir cuantitativamente la estructura diamétrica de rodales, para así por ejemplo evaluar si se trata de un bosque coetáneo o multietáneo. Este tipo de aplicaciones son comunes en estudios de ecología forestal y caracterización de bosques. Por ejemplo, Soto *et al.* (2010) ajustaron mediante el método de máxima verosimilitud la fdp de Weibull⁷ con datos de diámetro de un renoval adulto de coigüe ubicado en el predio Llancahue en Valdivia. El modelo de Weibull está dado por:

⁷La reparametrización de dos parámetros.

$$f(y) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{y}{\beta} \right)^{(\alpha-1)} \exp \left[- \left(\frac{y}{\beta} \right)^{\alpha} \right]; \quad [11]$$

para una variable aleatoria $y \geq 0$, y con parámetros α y β denominados de forma y de escala, respectivamente. Dos características fundamentales hacen que el modelo de Weibull sea tan popular en aplicaciones en ecología forestal y manejo: (a) puede adquirir diferentes formas de distribución, es un modelo versátil (van Laar y Akça 2007), y (b) sus parámetros tienen significado biológico, si $\alpha < 1$, la forma de la distribución será de tipo exponencial negativa, mientras que si $1 < \alpha < 3,5$ será de tipo unimodal. Por otra parte, el parámetro β puede ser interpretado como el percentil-63 de la distribución diamétrica, el 63 % de los árboles tienen un diámetro menor que β (Bailey y Dell 1973). La figura 5 muestra los valores observados (histogramas) y el ajuste del modelo de Weibull considerando todas las especies en conjunto y otras por separado.

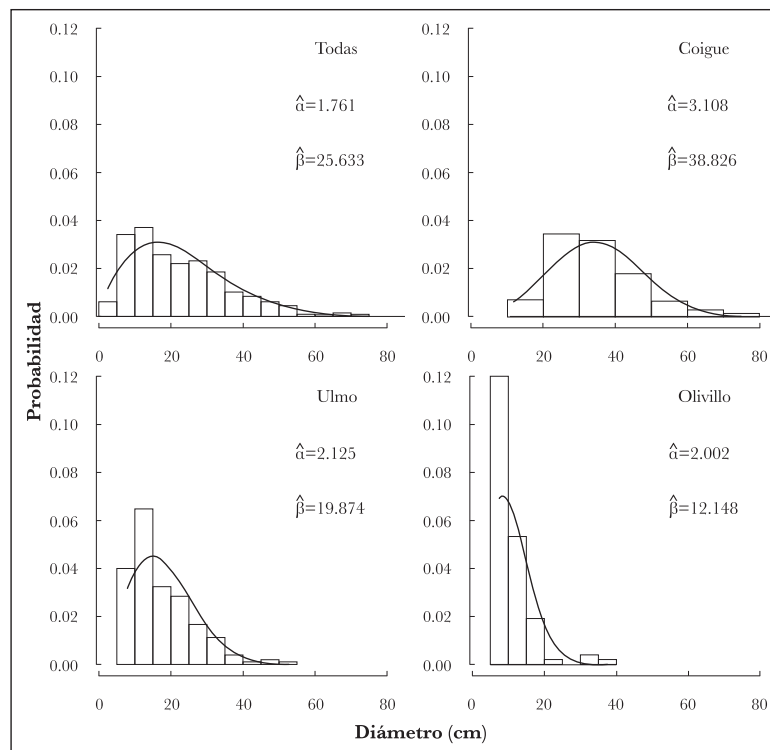


Figura 5. Histogramas observados para el diámetro y ajuste de la función de densidad de probabilidades de Weibull (ecuación 11) para árboles en un renoval adulto de coigüe en Llancahue (provincia de Valdivia) considerando todas las especies, coigüe, ulmo, y olivillo. α y β son los parámetros estimados mediante máxima verosimilitud para el modelo de Weibull. Mayores detalles pueden ser revisados en Soto et al. (2010).

La segunda aplicación de las fdps a distribuciones diamétricas, tiene que ver con predecir distribuciones diamétricas de rodales a lo largo del tiempo, se basa en la técnica de representar la distribución de frecuencia por una fdp cuyos parámetros sean posibles proyectarlos a través del tiempo empleando como variables predictoras variables de estado del rodal como edad, número de árboles, área basal, índice de sitio y altura a través de regresiones (figura 6). De esta manera es posible conocer la variación de la estructura del rodal con el tiempo y predecir la dinámica de las formaciones boscosas, sólo basándose en variables agregadas del rodal.

Si bien las funciones de densidad de probabilidad (fdp) son ampliamente usadas en biometría, existen pocas aplicaciones en bosques naturales chilenos. Alvarez y Grosse (1978) aplicaron la fdp Normal, para caracterizar con buenos resultados estructuras coetáneas de lenga en Aysén. Para la proyección de la estructura, utilizaron una relación parabólica entre la varianza diamétrica de los rodales y el diámetro

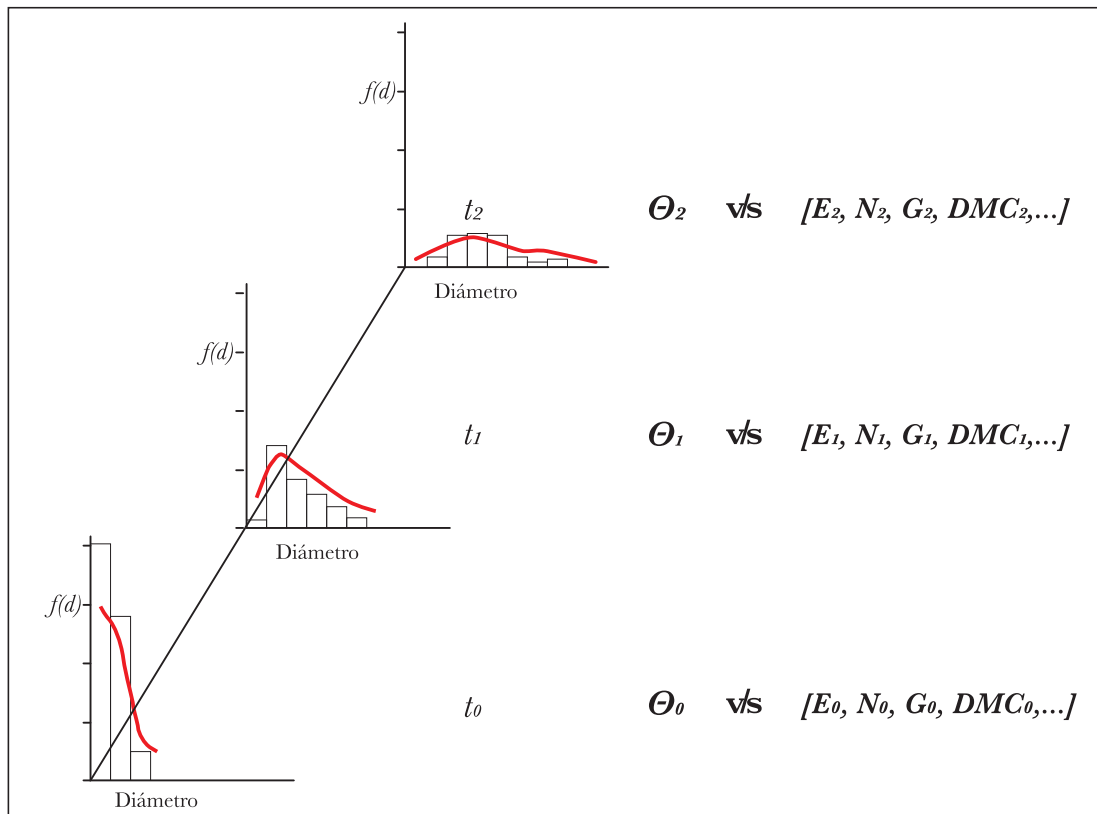


Figura 6. Método de predicción de parámetros para proyectar la distribución diamétrica usando una función de densidad de probabilidades. Se obtienen los parámetros estimados de una fdp (representado por el vector Θ) para las mediciones disponibles en el tiempo (en la figura en t_0 , t_1 y t_2) y se relacionan con variables de estado de rodal, como por ejemplo; edad (E), densidad (N), área basal (G), diámetro medio cuadrático (DMC) y otras, conocidas para cada medición disponible en el tiempo.

medio, donde ambas variables son parámetros de la función normal. Alvarez y Grosse (1978) también ajustaron la función Beta con buenos resultados, pero debido a que no encontraron una relación entre los parámetros de la función y el diámetro o edad del rodal, no la emplearon finalmente para estimar la evolución en el tiempo de los rodales de lenga. Entre tanto, Vergara (1982) caracterizó distribuciones diamétricas en renovales no intervenidos de raulí a través de la función de Weibull. Cerda (1990), empleando datos de renovales de canelo, ajustó los modelos de Beta, Sb de Johnson y de Weibull, encontrando mejores resultados con la primera de éstas funciones.

Bosques multietáneos. Otros tipos de modelos de distribución diamétrica corresponden a los que buscan representar el desarrollo de bosques multietáneos. De Liocourt (1898) encontró que para bosques irregulares en Europa, existía una cierta proporcionalidad entre el número de árboles de clases diamétricas sucesivas y estableció que el número de árboles respecto al diámetro descendía en progresión geométrica. Esta aseveración, matemáticamente se conoce en manejo forestal como Ley de De Liocourt (De Liocourt, 1898) o modelo de Meyer (Meyer 1952) y corresponde a la siguiente función exponencial negativa.

$$N_{cd_i} = \beta_0 e^{\beta_1 cd_i} ; \quad [12]$$

donde,

N_{cd_i} es el número de árboles en la hectárea para la i -ésima clase diamétrica cd_i ; β_0 y β_1 son parámetros del modelo a ser estimados; y e es la constante neperiana.

Estos modelos son importantes pues se emplean para la aplicación del sistema o cortas de selección (Smith 1962) en bosques multietáneos (Daniel *et al.* 1979).

La aplicación de modelos de distribución diamétrica en bosques naturales, es sumamente escasa. Para bosques del tipo forestal araucaria, Puente (1980) luego de ajustar el modelo de Liocourt en forma linealizada, plantea una regulación general de estos bosques bajo un criterio de permanencia, manteniendo las características de multietaneidad, basándose en las líneas de rodal ajustadas en su estudio mediante dicho modelo logarítmico. Donoso (2002) luego de caracterizar la estructura diamétrica en bosques siempreverdes ajustó diversos modelos para proponer la aplicación del sistema de selección. Posteriormente, Drake *et al.* (2005) empleando el mismo enfoque de Puente, incorporó mayores antecedentes para bosques mixtos de araucaria que le otorgan un enfoque más aplicado o de manejo forestal en el tema.

Modelos de densidad-tamaño medio. La variación en el número de árboles refleja un proceso continuo de eliminación que ocurre a lo largo de la vida de un

rodal desde que es joven hasta que se transforma en un bosque adulto (Assmann 1970). La representación geométrica en el tiempo del número de árboles presenta una forma de una función exponencial negativa, que ha sido históricamente ajustada mediante una expresión logarítmica simple del tipo:

$$\ln N = \beta_0 + \beta_1 \ln d_g ; \quad [13]$$

donde,

N es el número total de árboles vivos por unidad de superficie⁸, y d_g es el diámetro del árbol de área basal media o diámetro medio cuadrático (*DMC*).

Este modelo fue popularizado en las ciencias forestales por Reineke (1933), aunque fue Yoda *et al.* (1963) el que primeramente trabajó en el tema.

Este tipo de modelos son claves en silvicultura, y como tal han sido ocupadas en bosques naturales, aunque no tan profusamente. Si bien los primeros estudios que ajustaron modelos del tipo (13) en bosque nativo son los de Herrera y May (1976) y Soler (1978) en renovales de raulí y Alvarez y Grosse (1978) para lenga, es el trabajo de Puente *et al.* (1979) realizado en renovales de roble y raulí el que explica en su mejor expresión el uso y aplicación del modelo ajustado. Este estudio ha sido fundacional, y se ha empleado como base para definir normas de manejo de raleo de renovales de roble-raulí (Lara *et al.* 1999). A juicio del autor del presente documento, los trabajos⁹ del fallecido Prof. Mario Puente constituyen los primeros estudios de silvicultura cuantitativa en bosques naturales de Chile. Sin lugar a dudas que la muerte del Prof. Puente produjo un vacío importante en el conocimiento cuantitativo de la silvicultura de nuestros bosques naturales, lo cual se refleja claramente en la disminución de trabajos en un periodo de tiempo considerable.

Para bosques de canelo, Donoso *et al.* (2007b) ajustó diferentes modelos de densidad al segregar los datos en cuanto a pendiente y exposición. Gezán *et al.* (2007) ajustaron el modelo de densidad-tamaño (ecuación 13), empleando la mayor base de datos de unidades muestrales para renovales de roble-raulí-coigüe hasta ahora disponibles, a renovales del tipo roble, raulí, y coigüe, y así también propusieron curvas de densidad máxima y prepararon diagramas de manejo siguiendo a Gingrich (1967). Navarro *et al.* (2011) para canelo avanzaron en la estimación de la densidad máxima y construcción de diagramas de manejo para bosques en Chiloé. Para ilustrar las diferencias entre diferentes tipos de bosques, se han graficado (figura 7) las curvas de densidad-tamaño de modelos ajustados por diversos autores: estos son coigüe, raulí-mixto, y roble (Gezán *et al.* 2007); raulí-roble (Puente *et al.* 1979);

⁸ En el sistema métrico esta unidad es 1 hectárea, 10.000 m².

⁹ El Prof. Mario Puente fue profesor guía de las tesis de Herrera y May (1976) y Soler (1978).

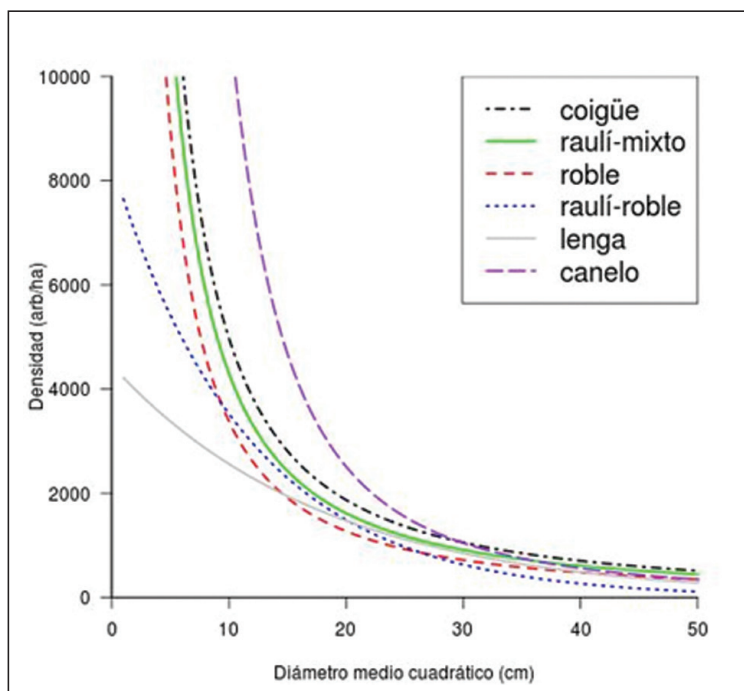


Figura 7. Curvas de densidad promedio estimadas para distintos tipos de bosques: coigüe, raulí-mixto, y roble (Gezán et al. 2007); raulí-roble (Puente et al. 1979); lenga (Álvarez y Grosse 1978); y canelo (Navarro et al. 2011).

lenga (Álvarez y Grosse 1978); y canelo (Navarro et al. 2011). Como se ve en la figura existen considerables diferencias entre cada una de las especies.

6.6.3 Modelos dinámicos

Investigación en modelación del crecimiento forestal. El número de estudios sobre modelación del crecimiento forestal difiere considerablemente entre plantaciones forestales y bosques naturales. La modelación fue reconocida como una herramienta clave para investigación, manejo y sistemas que ayudan a tomar decisiones en plantaciones en Chile (Olivares 1977, Peters 1983), pero este no ha sido el caso para los bosques naturales. Debido a la importancia económica de las plantaciones forestales en el país, en la década del 80, y en el marco de un proyecto FAO/PNUD, el INFOR y la universidad de Chile y UACH desarrollaron un primer simulador de crecimiento para plantaciones. Esto fue posible ya que el INFOR comenzó a establecer un sistema de unidades de muestreo permanentes (UMP) en 1962 a través de la distribución completa de las plantaciones de pino radiata en Chile (Peters 1983). Posteriormente, un grupo de empresas forestales y el gobierno de Chile, a través de “Fundación Chile” han invertido recursos en desarrollar un simulador de crecimiento para pino radiata (denominado hoy “Insigne”) y para *E. globulus* y *E. nitens* (denominado “Eucasim”). Un grupo de investigadores ha estado trabajando en el desarrollo de Radiata desde los 90, y el mismo grupo luego desarrolló Eucasim. Actualmente, ambos simuladores son ampliamente usados por las empresas

forestales. Existe al menos una versión académica disponible gratuitamente para uso educacional, principalmente en las universidades. En resumen, estudios de biometría en plantaciones son extensos, fundamentalmente por el avance de dos modernos simuladores, sin embargo, no existen publicaciones que reporten las metodologías y análisis que sustentan a los simuladores, lo que sin lugar a dudas no contribuye al avance científico.

No existen simuladores de crecimiento para bosques naturales de Chile. La mayoría de los estudios de crecimiento en bosques naturales son conducidos empleando una aproximación descriptiva, como usualmente se realiza en estudios ecológicos y silvícolas más que empleando modelación. Es importante destacar acá, y siguiendo lo propuesto por Pretzsch *et al.* (2002), que un modelo de crecimiento es una representación biométrica y matemática del proceso de crecimiento, mientras que el traspaso de este modelo de crecimiento a un programa computacional práctico para predecir escenarios futuros, constituye la creación de un simulador de crecimiento. Vale decir, si bien un simulador podría ser un set de modelos interrelacionados pero basados en una base muestral ínfima, eso no es lo que se considera acá como tal.

Dos intentos conocidos de desarrollo de simuladores de crecimiento de renovales de roble-raulí-coigüe, no han tenido mucho éxito. El primero de ellos impulsado por el INFOR (Bahamóndez 1995, Bahamóndez *et al.* 1998), quienes construyeron un modelo de crecimiento a nivel de árbol individual dependiente de la distancia basado en tres UMPs (de 1 ha cada una) establecidas en 1991, y remedida por última ocasión en 1996, en renovales de roble-raulí-coigüe de 37–56 años. Bahamóndez (1995) presentó tanto los modelos de crecimiento en diámetro y en altura comercial¹⁰. Desafortunadamente no es del todo claro, desde su publicación, cuantos periodos de remediciones existieron y cuantos árboles se emplearon en el ajuste de los modelos. No se realizó una validación de sus modelos, y sólo llevó a cabo un análisis limitado del comportamiento del modelo. Siguiendo el trabajo de Bahamóndez (1995), Bahamóndez *et al.* (1998) presentaron lo que ellos denominan el simulador final. Estos autores usaron los mismos modelos de crecimiento en diámetro y altura de Bahamóndez (1995), y brevemente explicaron en palabras el algoritmo de mortalidad. También entregaron modelos biométricos estáticos para roble y raulí, tales como ecuaciones de ahusamiento, $h-d$, y de diámetros de copa. Desafortunadamente, no reportaron sus parámetros estimados ni alguna evaluación estadística del modelo. Un programa computacional (*software*), de uso público o al menos no restringido, de este denominado simulador no se encuentra disponible.

El segundo intento para desarrollar un simulador para renovales roble-raulí-coigüe fue llevado a cabo por la Universidad Austral de Chile (UACH), mediante un proyecto FONDEFF (Ortega y Gezán 1998a, 1998b), que buscaba construir un

¹⁰Definida por Bahamóndez (1993) como la altura en el fuste con un diámetro límite de 10 cm.

simulador a nivel de rodal. Ellos compilaron los datos existentes de investigaciones previas, establecieron (pero no se remidieron) un set de 128 UMPs a través de la distribución geográfica de este tipo de bosques, realizaron análisis fustal, y tomaron tarugos de incremento para árboles muestra. Desafortunadamente, ningún simulador ha sido oficialmente producido desde este proyecto. A excepción de los diagramas de manejo de Gezán *et al.* (2007), el desarrollo descriptivo del área basal de Lusk y Ortega (2003), y los modelos de ahusamiento de Gezán *et al.* (2009), ninguna publicación detalla la estructura del modelo, funcionamiento, y evaluación de éste.

No existen datos públicamente disponibles de un sistema de UMP en bosques naturales de Chile. Tal como fue mencionado anteriormente, Chile ha invertido en mantener un set de UMP para plantaciones, las que han sido la base para el desarrollo de los simuladores de plantaciones. Sin embargo, aparte de unas pocas y aisladas parcelas en ensayos silvícolas permanentes, no existe un sistema de UMP de bosques naturales. Con respecto a este punto, si bien hoy en día el INFOR ha liberado información de UMPs (ver sección sobre IFC), hay que tener en consideración que una parte importante de ellas no son permanentes, y que además la ubicación de éstas no se ha hecho pública¹¹, lo cual imposibilita por una parte una evaluación sin error de muestreo del crecimiento así como también poder establecer mayores análisis al desconocer las características específicas del sitio que determinan cada unidad de muestreo. Armesto (1990) destaca la importancia de mantener ensayos ecológicos de largo plazo en estudios Chilenos, pero también nota que el horizonte de corto plazo de los programas de investigación Chilenos no es apropiado. El Prof. Claudio Donoso, quien ha mantenido el más antiguo y regularmente medido set de UMPs en bosques Chilenos, en reiteradas ocasiones ha destacado las dificultades para mantener ensayos silvícolas de largo plazo en bosques naturales de Chile (Donoso 2006b). Quizás el mayor problema con experimentos silvícolas, de acuerdo a Armesto *et al.* (1999), es que el diseño, ejecución, y monitoreo de grandes experimentos siguen siendo muy costosos y difíciles operacionalmente. Además, entre los ensayos silvícolas permanentes mencionados por Lara *et al.* (2000), muy pocos han sido remedidos y aún una menor cantidad de artículos o reportes describen sus mediciones y establecimiento. En resumen, sólo unas pocas y aisladas (en términos de estudios) unidades de muestreo permanentes existen en bosques naturales de Chile. Un esfuerzo reciente en este sentido, corresponde a un proyecto¹² financiado por el fondo de investigación del bosque nativo donde se remidieron 30 UMPs previamente establecidas en renovals de roble-raulí-coigüe.

¹¹Comunicación personal con Carlos Bahamóndez, encargado de inventario del INFOR.

¹²Detalles sobre este proyecto llevado a cabo por la Universidad de La Frontera (UFRO), UACH e INFOR, se encuentran en el sitio web www.biometriabosques.com

Productividad de sitios. La productividad de sitios de bosques naturales no ha sido poco estudiada, aún en los bosques de roble-raulí-coigüe. Los estudios que existen han sido mayormente descriptivos. A pesar del potencial forestal de los bosques de segundo crecimiento de roble-raulí-coigüe, y la importancia que reviste en manejo forestal de estimación de productividad de sitios, existen solo unos pocos estudios de productividad de ellos. La investigación en productividad de sitios de bosques de *Nothofagus* puede ser clasificada en estudios descriptivos y de modelación. El primer estudio descriptivo es el de Donoso *et al.* (1993b), donde se colectaron 120 árboles de análisis fustal de roble y raulí a través de la distribución completa de roble-raulí. Ellos propusieron zonas de crecimiento para bosques de roble-raulí basados en índices de sitio promedio (altura de un árbol a una edad clave de 20 años) e incremento medio anual del rodal (estimado bajo una serie de supuesto debido a la falta de datos apropiados) a los 20 años. Donoso *et al.* (1993b) generaron mapas de zonas de crecimiento, los cuales son subjetivos porque su delineación fue basada en tratar de hacer coincidir las variables de sitio con las ubicaciones geográficas. Thiers (2004) empleó los mismos árboles de análisis fustal de roble de Donoso *et al.* (1993b) y otros provenientes de otras fuentes para analizar los efectos de variables edáficas y climáticas en el índice de sitio de roble en 55 rodales. Usando análisis multivariado, Thiers (2004) encontró que el índice de sitio está relacionado con el clima a nivel nacional, y a variables del suelo a escalas regionales. Conclusiones similares fueron reportadas por Schlatter y Gerding (1995) en Chile. El estudio de Thiers (2004) se centra principalmente en aspectos edáficos de productividad, y ningún modelo producto de su investigación se ha hecho disponible de manera pública. Echeverría y Lara (2004) usaron crecimiento diametral medido en taladros de incremento colectados desde 32 parcelas en un área mucho más reducida que la estudiada por Donoso *et al.* (1993b), para mediante análisis multivariado delinearon zonas de crecimiento para bosques de roble-raulí. Los bordes de sus zonas de crecimiento son muy generales y básicamente corresponden a unidades fisiográficas de Chile: cordillera de la Costa, valle central y cordillera de Los Andes. Tanto el uso del crecimiento diametral como referencia para clasificar productividad forestal como el combinar dos especies (raulí y roble), sin proveer una justificación científica constituyen un problema en el estudio de Echeverría y Lara (2004).

Estudios de modelación de productividad de bosques de *Nothofagus* son limitados e incompletos en algunos aspectos. Aparte de algunos estudios sin evaluación de externos en modelos de índices de sitio, tales como los de Burgos (1984) y Moreno (2001), quienes usaron 23 y 51 árboles de análisis fustal de raulí, respectivamente, se pueden destacar los siguientes estudios en roble-raulí-coigüe. Trincado *et al.* (2002) usando 26 (roble) y 24 (raulí) árboles de análisis fustal de Donoso *et al.* (1993b), y cubriendo un rango geográfico menor, ajustaron un modelo polimórfico de índice de sitio basado en el método de las diferencias propuesto por

Cieszewski y Bella (1989). Trincado *et al.* (2002) propusieron un modelo para cada especie, y graficaron curvas de índice de sitio para una edad clave de 20 años. Salas y García (2006), usando 30 árboles de análisis fustal de roble colectados en una sola localidad de 435 ha cerca de Temuco (Rucamanque) en el valle central de Chile, ajustaron un modelo de crecimiento en altura empleando el método de ajuste de las ecuaciones diferenciales estocásticas de García (1983). Los autores restringieron el valor de la asíntota del modelo a ser compatible con datos de altura-edad colectados en un bosque adulto remanente de la misma localidad. Esse *et al.* (2007) colectaron 150 árboles de análisis fustal de coigüe en un área de Los Andes de la región de la Araucanía, y ajustaron modelos de crecimiento en altura así como graficaron curvas de índice de sitio empleando una edad clave de 40 años.

Salas (2011) luego de especificar una serie de problemas con cada uno de los estudios de modelación de productividad, desarrolló modelos de crecimiento en altura de árboles dominantes para roble, raulí, y coigüe, empleando la mayor base de datos disponible en Chile para estos fines a la fecha, abarcando desde los 36° 30' (Concepción) hasta los 41° 30' (Puerto Montt), tomando en consideración en su proceso de ajuste de modelos tanto la correlación temporal de los datos, como así también la estructura jerárquica de estos.

Salas (2011) en base a una ecuación diferencial autónoma, que fue derivada a partir del modelo de crecimiento biológico de von Bertalanffy (1957), propuso un nuevo tipo de índice de sitio: “tasa de crecimiento en altura a una altura de referencia¹³” en vez del índice de sitio tradicional que corresponde a altura a una edad clave.

Luego de ajustar los modelos para cada especie empleando modelos de efectos mixtos no lineales, Salas empleo cuatro índices de sitio: 0,3; 0,5; 0,7 y 0,9 m/año cuando el árbol tiene 10 m de altura¹⁴, y graficó el comportamiento del modelo para cada índice. Para construir este simple sistema dinámico de tiempo continuo donde la ecuación diferencial es función de la altura, de los parámetros estimados y del índice de sitio, se comenzó con una altura inicial de 1,3 m y un tiempo inicial de 0,5 años¹⁵. Al emplear la tasa de crecimiento en altura versus la variable estado (i.e., altura) en vez de versus tiempo (i.e., edad a la altura del pecho), se permite fácilmente diferenciar entre sitios (figura 8 presenta un ejemplo para coigüe).

El modelo propuesto demostró un buen ajuste para las series de crecimiento en altura observadas (figuras 9a, 9b y 9c para coigüe, raulí, y roble, respectivamente) de las tres especies de *Nothofagus* estudiadas por Salas (2011), i.e., coigüe, raulí y

¹³ o base o clave.

¹⁴ Este valor de 10 m es arbitrario y sólo referencial, y puede ser cambiado de acuerdo a las preferencias de cada usuario.

¹⁵ Estos valores quedan determinados por el algoritmo estocástico propuesto por Salas (2011) y empleado para reconstruir la altura de los árboles muestra.

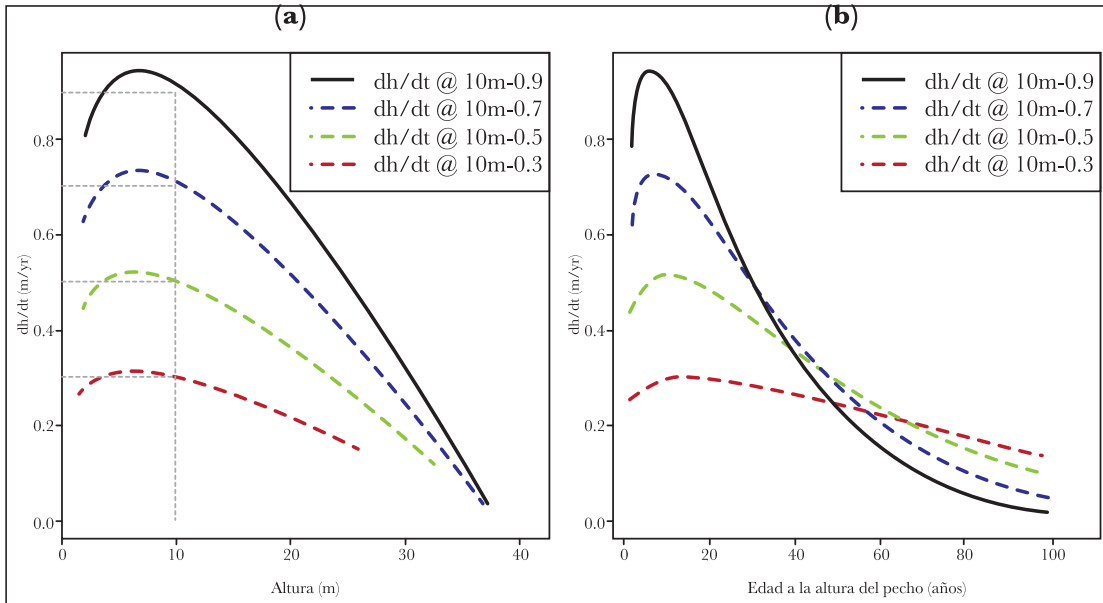


Figura 8. Comportamiento del modelo de crecimiento en altura de coigüe. Tasa de crecimiento en altura versus altura (a) y versus edad a la altura del pecho (b) para diferentes índices de sitios: i.e., tasas de crecimiento en altura a una altura de referencia de 10 m.

roble. Nótese que la primera fila de curvas de la figura 9 corresponde a las curvas de crecimiento en altura empleando el índice de sitio propuesto por Salas (2011), i.e., tasa de crecimiento en altura a una altura clave, mientras que empleando los mismos modelos, se muestran las curvas que representarían curvas de crecimiento en altura empleando el índice de sitio tradicional, i.e., altura a una edad clave.

Finalmente, es importante destacar que Salas (2011) también comparó el uso de la edad a la altura del pecho (*edap*) versus emplearla edad total (*etot*) como variable de tiempo cuando se modela el crecimiento en altura. Los resultados del estudio indicaron, para todas las especies estudiadas (i.e., roble, raulí, coigüe), que es preferible emplear *edap* en vez de *etot*, dado que disminuye considerablemente la variabilidad de la altura inherente al periodo de establecimiento de los árboles en condiciones naturales. Así también desde el punto de vista práctico, es sin lugar a dudas más fácil de obtener una medición de *edap* que de la *etot*.

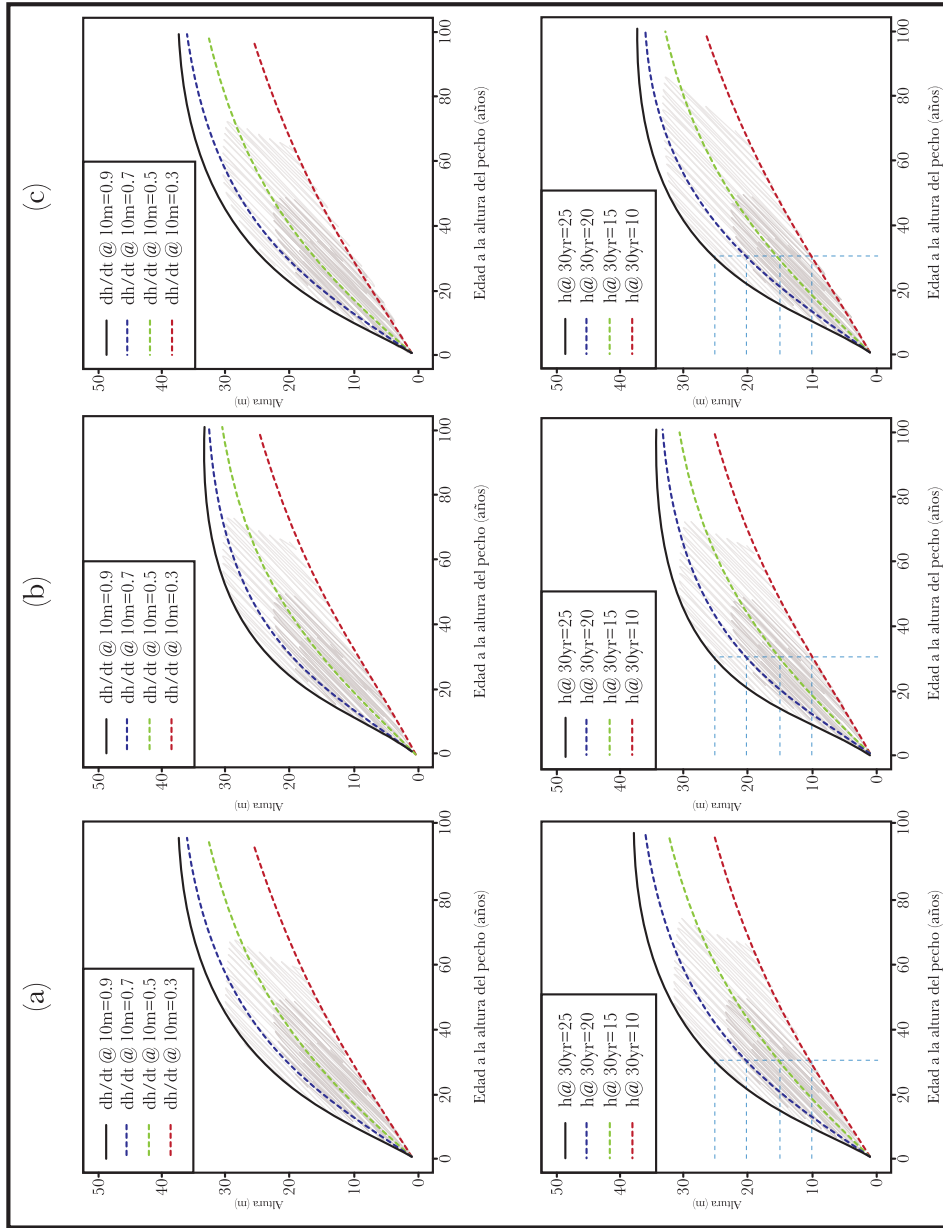


Figura 9: Modelos de crecimiento en altura de Salas (2011) y sus respectivas series de crecimiento observadas. Curvas de crecimiento en altura versus edad a la altura del pecho para diferentes índices de sitios: (primera fila del panel) tasa de crecimiento en altura a una altura de referencia de 10 m y (segunda fila del panel) altura a una edad de referencia (i.e., índice de sitio tradicional) de 30 años para coigüe (a), rauli (b), y roble (c).

6.7 Discusión final

Se presenta a continuación una discusión general sobre la biometría forestal aplicada en Chile, mediante la respuesta a dos preguntas claves del quehacer de una disciplina.

6.7.1 ¿Dónde estamos?

Los muestreos aplicados en Chile siguen siendo bastante convencionales, es decir, mediante el empleo de unidades de muestreo de superficie fija. Los estimadores derivados de dichas unidades muestrales son insesgados ya que se conocen las probabilidades de selección de cada una de ellas (Gregoire y Valentine 2008). Así también, se han aplicado muestreos que requieren menor esfuerzo en terreno (i.e., “más prácticos”), y que en la mayoría de los casos son de tipo no probabilísticos. Estos muestreos se han utilizado fundamentalmente para llevar a cabo caracterizaciones: botánicas, como por ejemplo, el método de los cuartos centrado en un punto (Cottam y Curtis, 1956); y así también forestales mediante métodos que se basan en la medición de un número fijo de árboles por punto de muestreo (Greg-Smith 1964; Pielou 1977), que se denominan del k -ésimo árbol. Sin embargo, no es ampliamente reconocido que los muestreos del tipo k -ésimo árbol pueden presentar serios sesgos en la estimación de parámetros poblacionales. Por otra parte, los muestreos de probabilidad variable (e.g., de muestreo puntual horizontal) han sido aplicados en raras ocasiones en Chile, aunque estos poseen una sólida fundamentación probabilística¹⁶, un buen poder inferencial, y requieren de un considerable menor esfuerzo que al emplear unidades de muestreo de superficie fija.

El inventario forestal nacional continuo (ICF) del INFOR es vital por una serie de razones, dentro de las cuales destacan la determinación del stock en crecimiento, así como el reporte estadístico sobre el estado de los bosques a nivel nacional, especialmente este último un aspecto especialmente crítico en países en vías de desarrollo (Saket 2002). El éxito de este IFC estará dado en la medida que los datos se hagan ampliamente disponibles y se logre una remediación periódica estable de las unidades de muestreo permanente (UMP). Es de esperar que en un futuro cercano el INFOR comparta, en su calidad de institución dependiente del Estado de Chile, plenamente no tan sólo la información registrada en las UMPs, sino que también la ubicación geográfica de éstas. De este modo se abrirán campos de colaboración, potenciando el desarrollo de investigación en conjunto con investigadores que

¹⁶ Debida fuertemente al trabajo de L. Grosenbaugh (e.g., Grosenbaugh 1952), quien empleando los aspectos geométricos inicialmente dados por W. Bitterlich, desarrollo las bases probabilísticas del muestreo puntual horizontal.

cultivan diferentes disciplinas, e.g., el monitoreo de una especie sensible de fauna que habita en las copas de los árboles.

Si bien existen modelos dendrométricos estáticos, el uso de éstos en aplicaciones está limitado por carecer de una revisión exhaustiva de: los rangos de ajuste, de la base muestral empleada para construirlos, y de los estadísticos de predicción de los modelos. Esto se debe fundamentalmente a que falta reconocer la importancia de los modelos de: altura-diámetro; volumen; y de ahusamiento en las caracterizaciones silvícolas, en donde dichos modelos son claves. Así también existe una clara divergencia en los procedimientos y variables medidas entre las UMPs establecidas con fines biométricos y aquellas establecidas con fines silviculturales.

Aunque han existido algunas iniciativas, Chile no cuenta con un simulador de crecimiento operativo para bosques naturales. Un aspecto central de un simulador corresponde a la definición de niveles de productividad. El estudio de la productividad de sitios para especies nativas requiere una mayor interacción, que la existente hasta la fecha, entre silvicultores, expertos en suelo y clima, y biómetras forestales. Por ejemplo, la definición de altura dominante (que tiene un efecto vital en el índice de sitio), la superficie de referencia a emplear, y las características de los árboles empleados para la estimación de la altura dominante es un aspecto clave que especialistas en estas distintas disciplinas deberían definir en conjunto.

6.7.2 ¿Dónde debiéramos ir?

Los aspectos claves en donde se debieran centrar los esfuerzos en los próximos años en biometría forestal en Chile son como sigue:

- Desarrollo de una estandarización básica de muestreo en bosques naturales, al menos con respecto a la medición de árboles. Aunque esto pareciera básico, existen una serie de dificultades que evitan que se puedan emplear datos colectados por diferentes fuentes. Debiera reforzarse la idea que en ensayos silvícolas no tan sólo se evalúe el diámetro sino que también la altura. La estandarización acá mencionada debiera enfocarse fundamentalmente en la remediación de árboles en unidades de muestreo permanentes. Todo lo anterior implica consensuar incluso ciertos procedimientos de establecimiento y medición de ensayos permanentes.
- Establecer una nomenclatura común de variables dendrométricas para Chile sería importante para facilitar la conversación entre los diversos actores ligados a aspectos cuantitativos de los bosques. Un especial énfasis se debiera dar a nuevas variables (i.e., diferentes a las tradicionales) que se están registrando en los últimos años.
- Realizar evaluaciones exhaustivas de los modelos biométricos en bosques naturales. Así como también, avanzar en la medición de variables que representen

aspectos pocos estudiados hasta la actualidad en ecosistemas forestales (e.g., productos forestales no madereros, mortalidad, biomasa y degradación), y así como su evaluación y modelación.

- Estudiar el efecto de los problemas sanitarios en la determinación de existencias, para de esta manera realizar estimaciones con mejor precisión de las realmente disponibles en calidad y dimensiones, facilitando la transformación de existencias brutas medidas, en existencias netas reales determinadas con una base científica. Este aspecto no sólo es importante desde el punto de vista de la biometría sino también de la silvicultura en donde la selección de árboles a extraer en raleos generalmente omiten el aspecto sanitario por carecer de visibilidad externa.

El objetivo “superior” en biometría es construir un simulador de crecimiento operativo para bosques naturales, el cual no tan solo es vital en la toma de decisiones sino que también para ser empleado para fines científicos. Esto debe ser desarrollado no sólo como un ejercicio académico (que podría ser realizado en el marco de un proyecto de investigación), sino que debiera ser llevado a cabo como un trabajo colaborativo de diferentes investigadores y profesionales forestales, pero con un liderazgo claro de un grupo de investigadores. La obtención final de un simulador operativo, estará dado por una fuente de financiamiento en el tiempo y quizás requiera una década de trabajo. Un excelente ejemplo del desarrollo de un simulador para bosques naturales, puede ser extraído de la experiencia acumulada por el equipo de investigadores del Servicio Forestal de USA quienes han desarrollado el simulador FVS (*Forest Vegetation Simulator*) basado en el modelo originalmente propuesto por Stage (1973). Un ejemplo local a seguir es el trabajo desarrollado por el proyecto nacional de simulación Radiata, y también empleando la modalidad de cooperativas para así facilitar la participación de empresas. Por ejemplo, crear una Cooperativa de manejo y crecimiento de bosques naturales. Sólo mediante un trabajo organizado y colaborativo podremos contar en un futuro con un modelo de crecimiento aplicable.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la revisión de la Dra. Alicia Ortega y Carlos Bahamóndez de una versión preliminar de este capítulo. De la misma manera, se agradece al Dr. Pablo Donoso, Dr. Rodrigo Mujica, Dr. Roland Peters, Prof. Patricio Núñez y Cristian Higuera, por facilitar datos empleados en este capítulo. Finalmente, C. Salas agradece a los proyectos: FIBN No. 068/2010, FONDECYT No. 11110270 y FONDECYT No. 1110744 que han permitido complementar el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aguirre S, P Infante. 1988. Funciones de biomasa para boldo (*Peumus boldus*) y espino (*Acacia caven*) de la zona central de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal* 2(3): 45–50.
- Álvarez S, H Grosse. 1978. Antecedentes generales y análisis para el manejo de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl. Krasser)). Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 194 p.
- Armesto JJ. 1990. Estudios a largo plazo: una prioridad para la investigación ecológica de hoy. *Rev. Chilena de Historia Natural* 63: 7–9.
- Armesto JJ, I Casassa, O Dollenz. 1992. Age structure and dynamics of patagonian beech forests in Torres del Paine National Park, Chile. *Vegetatio* 98(1): 13–22.
- 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. En: Donoso C, A Lara (Eds.) *Silvicultura de bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 69–94.
- Assmann E. 1970. *The Principles of Forest Yield Study*. English edition. Pergamon Press, Oxford, England. 506 p.
- Avery TE, HE Burkhart. 2002. *Forest Measurements*. 5th edition. McGraw-Hill, New York, USA. 456 p.
- Bahamóndez C. 1994. Método para localización de parcelas permanentes basado en uso de imágenes digitales. *Ciencia e Investigación Forestal* 8(2): 345–356.
- Bahamóndez C. 1995. Modelos de crecimiento individual para renovales de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp et Endl)). *Ciencia e Investigación Forestal* 9(1): 57–72.
- Bahamóndez C, M Martin, C Kahler, R Blanco. 1998. Modelos de simulación para renovales de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp et Endl)). In *Primer Congreso Latinoamericano IUFRO*. Valdivia, Chile.
- Bahamóndez C, M Martin (2004) Caracterización productiva de los recursos forestales nativos de las regiones IX a X. Informe final de proyecto FDI-CORFO FM-14, Instituto Forestal (INFOR), Valdivia, Chile.
- Bahamóndez C, M Martin, S Müller-Using, A Pugin, Y Rojas, G Vergara, O Peña, M Uribe, R Ipinza. 2007. Inventario de los bosques de alerce. Informe final de proyecto, Instituto Forestal (INFOR), Valdivia, Chile. 166 p.
- Bailey RL, TR Dell. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science* 19(2): 97–104.
- Borders BE, RA Souter, RL Bailey, KD Ware. 1987. Percentil-based distributions characterize forest stand tables. *Forest Science* 33(2): 570–576.
- Bossel H. 1991. Modelling forest dynamics: Moving from description to explanation. *Forest Ecology and Management* 42(1-2): 129–142.

- Bown H. 1992. Biomasa en bosques de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl) Krasser) en la provincia de Última Esperanza, XII región. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 75 p.
- Burgos R. 1984. Determinación de índices de sitio para renovales de Raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp et Endl)) en la cordillera andina de la VIII Región. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Concepción, Chillán, Chile. 35 p.
- Burk TE, HE Burkhart. 1984. Diameter distributions and yields of natural stands of loblolly pine. School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, Publ. FWS-1-84. Blacksburg, VA, USA. 46 p.
- Burkhart HE, TG Gregoire. 1994. Forest biometrics. In Patil GP & CR Rao (Eds.) Handbook of statistics, Vol. 12, Environmental Statistics. Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands, p. 377–407.
- Burschel P, C Gallegos, O Martínez, W Moll. 1976. Composición y dinámica regenerativa de un bosque virgen mixto de raulí y coigüe. *Bosque* 1(2): 55–74.
- Campos J. 1998. Productos forestales no madereros en Chile. FAO, Serie Forestal No. 10, Santiago, Chile. 95 p.
- Carrasco J. 1986. Estudio comparativo de dos métodos para evaluar la calidad a árboles en pie y para representar la forma del fuste en el bosque siempreverde Valdiviano. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 117 p.
- Catalán R. 2000. Productos forestales no madereros: una oportunidad para el desarrollo de las comunidades rurales y la conservación de los bosques templados del Sur de Chile. *Bosque Nativo* 24: 3–6.
- Cerda J. 1990. Modelos de distribución diamétrica en rodales de canelo (*Drimys winteri* Forst). Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 75 p.
- Christie DA, A Lara, J Barichivich, R Villalba, MS Morales, E Cuq. 2009. El Niño-Southern oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 309–319.
- Cieszewski CJ, IE Bella. 1989. Polimorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Can. J. For. Res.* 19: 1151–1160.
- CONAF, CONAMA, BIRF. 1999. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile, Informe nacional con variables ambientales. Proyecto CONAF/CONAMA/Birf, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco, Santiago, Chile. 89 p.
- Corvalán P. 1980. Tamaño óptimo de parcelas de muestreo distribuidas sistemáticamente en retículo cuadrado en inventarios de bosque nativo. *Ciencias Forestales* 2(1): 37–44.
- Corvalán P. 1987. Estratificación de tablas de volumen para Lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) según estructura y fase de desarrollo del bosque, Skyring, provincia de Magallanes. *Ciencias Forestales* 5(1): 3–20.
- Corvalán P. 1998. Modelos dendrométricos para la especie *Araucaria araucana* (Mol). C. Koch en rodales fuertemente intervenidos. *Ciencias Forestales* 12(1-2): 33–41.

- Corvalán P, L Araya, S Blanco, F Cox. 1987a. El canelo: una alternativa de desarrollo para la X región. Volumen III Metodología, Fondo de Investigación Agraria y Universidad de Chile, Santiago, Chile. 145 p.
- Corvalán P, L Araya, R Calquin, V Loewe, S Niebuhr. 1987b. El canelo: una alternativa de desarrollo para la X región. Volumen IV Resultados, Fondo de Investigación Agraria y Universidad de Chile, Santiago, Chile. 185 p.
- Cottam G, Curtis JT. 1956. The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* 37(3): 451–460.
- Cox F. 1976. Estudio metodológico de inventarios de reconocimiento en bosques naturales. *Bosque* 1(2): 75–86.
- Cox F. 1980. Inventario forestal nacional permanente de bosque nativo. Diseño y manual de instrucciones. Documento de Trabajo No. 33 (Proyecto FO: DP/CHI/76/003), Santiago, Chile. 121 p.
- Cubbage F, PM Donagh, JS Júnior, R Rubilar, P Donoso, A Ferreira, V Hoefflich, 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.
- Cubillos V. 1987. Modelo de crecimiento diametral para algunos renovales de raulí. *Ciencia e Investigación Forestal* 1(1): 67–76.
- Cubillos V. 1988a. Funciones de volumen y factor de forma para renovales de coigüe. *Ciencia e Investigación Forestal* 2(4): 63–68.
- Cubillos V. 1988b. Funciones de volumen y factor de forma para renovales de raulí. *Ciencia e Investigación Forestal* 2(3): 103–113.
- Curtis RO. 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science* 13(4): 365–375.
- Daniel TW, JA Helms, FS Baker. 1979. Principles of Silviculture. 2nd edition. McGraw-Hill, New York, USA. 500 p.
- Davis S, VH Heywood, O Herrera-MacBryde, J Villa-Lobos, AC Hamilton (Eds.). 1994. Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas. IUCN Publications Unit, Cambridge, England.
- De Liocourt F. 1898. De l'amenagement des sapinières. Bulletin trimestriel, Société forestière 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. 1979. Genecological differentiation in *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. in Chile. *Forest Ecology and Management* 2: 53–66.
- Donoso C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Investigación y Desarrollo Forestal (CONAF/PNUD/FAO), Documento de Trabajo No. 38 (Publicación FAO), Santiago, Chile. 82 p.
- Donoso C. 1987. Variación natural en especies de *Nothofagus* en Chile. *Bosque* 8(2): 85–97.
- Donoso C. 1989a. Antecedentes básicos para la silvicultura del tipo forestal siempreverde. *Bosque* 10(1): 37–53.

- Donoso C. 1989b. Regeneración y crecimiento en el tipo forestal siempreverde costero y andino tras distintos tratamientos silviculturales. *Bosque* 10(2): 53–64.
- Donoso C. 1995. Bosques templados de Chile y Argentina: Variación, estructura y dinámica. Tercera edición. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 484 p.
- Donoso C. (Ed.). 2006a. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Marisa Cuneo Ediciones, Valdivia, Chile. 678 p.
- Donoso C. 2006b. ¿Qué pasa con el manejo de los bosques nativos? *Chile Forestal* 324: 23.
- Donoso C, L Landrum. 1979. *Nothofagus leonii* Espinosa a natural hybrid between *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. and *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser. *New Zealand Journal of Botany* 17: 353–360.
- Donoso C, J Morales, M Romero. 1990. Hibridación natural entre roble (*Nothofagus obliqua*) (Mirb) Oerst y raulí (*Nothofagus alpina*) (Poepp. & Endl.) Oerst, en bosques del sur de Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural* 63: 49–60.
- 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 Barrales. 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 C, P Donoso, M González, V Sandoval. 1999a. Los bosques siempreverdes. En: Donoso C, A Lara (Eds.) Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 297–339.
- Donoso P, M González, B Escobar, I Basso, L Otero. 1999b. Viverización y plantación de Raulí, Roble y Coigüe. En: Donoso C, A Lara (Eds.) Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 177–244.
- Donoso C, AC Premoli, L Gallo, R Ipinza (Eds.). 2004. Variación Intraespecífica en las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 426 p.
- Donoso PJ. 2002. Structure and growth in coastal evergreen forests as the bases for uneven-aged silviculture in Chile. Ph.D. dissertation, State Univ. of New York, Syracuse, NY, USA. 256 p.
- Donoso PJ, LA Otero. 2005. Hacia una definición de país forestal: ¿Dónde se sitúa Chile? *Bosque* 26(3): 5–18.
- Donoso PJ, V Gerding, D Uteau, DP Soto, O Thiers, C Donoso. 2007a. Efecto de fertilización y cobertura de malezas en el crecimiento inicial y la mortalidad de una plantación de *Nothofagus dombeyi* en la Cordillera de Los Andes. *Bosque* 28(3): 249–255.
- Donoso PJ, DP Soto, RA Bertín. 2007b. Size-density relationships in *Drimys winteri* secondary forests of the Chiloe Island, Chile: Effects of physiography and species composition. *Forest Ecology and Management* 239(1-3): 120–127.
- Drake F, P Emanuelli, E Acuña. 2003. Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo. Universidad de Concepción y Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo (CONAF-KfW-DED-GTZ), Santiago, Chile. 196 p.

- Drake F, MA Herrera, E Acuña. 2005. Propuesta de manejo sustentable de *Araucaria araucana* (Mol. C. Koch). *Bosque* 26(1): 23–32.
- Echeverría C, A Lara. 2004. Growth patterns of secondary *Nothofagus obliqua* – *N. alpina* forests in southern Chile. *Forest Ecology and Management* 195: 29–43.
- Espinosa M, J García, E Peña. 1988. Evaluación del crecimiento de una plantación de Raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp et Endl.) Oerst.) a los 34 años de edad. *AgroCiencia* 4(1): 67–74.
- Esse CR, CO Navarro, JC Pinares. 2007. Curvas de índice de sitio para *Nothofagus dombeyi* en la zona preandina, provincia de Cautín, IX Región, Chile. *Bosque* 28(2): 142–151.
- Ferreira O. 1973. Recopilación de tablas de volumen para especies nativas chilenas. Informe Técnico 43, Instituto Forestal, Santiago, Chile, 56 p.
- Frayser WE, GM Furnival. 1999. Forest survey sampling designs: A history. *J. Forestry* 97(12): 4–10.
- Fuenzalida S. 1975. Tabla local de volumen para lenga *Nothofagus pumilio* Skyring - Magallanes. Informe Técnico 49, Instituto Forestal, Santiago, Chile, 21 p.
- García O. 1983. A stochastic differential equation model for the height growth of forest stands. *Biometrics* 39(4): 1059–1072.
- Gayoso J, J Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos de Chile. *Bosque* 26(2): 33–38.
- Gerding V, O Thiers. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural* 75: 819–833.
- Gezán S, A Ortega, E Andenmatten. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 28(2): 97–105.
- Gezán SA, PC Moreno, A Ortega. 2009. Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 30: 61–69.
- Gilabert H, ME McDill. 2010. Optimizing inventory and yield data collection for forest management planning. *Forest Science* 56(5): 578–591.
- Gingrich SF. 1967. Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forests in the central states. *Forest Science* 13(1): 38–53.
- González ME. 2005. Fire history data as reference information in ecological restoration. *Dendrochronologia* 22: 149–154.
- González ME, TT Veblen, C Donoso, L Valeria. 2002. Tree regeneration responses in a lowland *Nothofagus*-dominated forest after bamboo dieback in South-Central Chile. *Plant Ecology* 161(1): 59–73.
- González RE. 2006. Funciones spline cúbicas para describir el perfil del fuste comercial de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst. Var. *obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. Et Endl.) Perst.). Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 43 p.
- Gregoire TG. 2001. Biometry in the 21st century: Whither statistical inference? In Rennolls K (Ed.) Proceedings of IUFRO 4.11 Conference “Forest Biometry, Modelling and Information Science”. University of Greenwich, Greenwich, England, p. 15 p.

- Gregoire TG. 2004. Statistical methodology in forestry. In EOLSS (Ed.) Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Vol. II, Biometrics. Developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, U.K., p. 900–916.
- Gregoire TG, M Köhl. 2000. Statistical ecology and forest biometry. *Environmental and Ecological Statistics* 7: 213–216.
- Gregoire TG, HT Valentine. 2008. Sampling Strategies for Natural Resources and the Environment. Chapman & Hall/CRC, New York, USA. 474 p.
- Grosenbaugh LR. 1952. Plotless, timber estimates – new, fast, easy. *J. of Forestry* 50(1): 32–37.
- Grosse H. 1989. Renovales de raulí, roble, coigüe y tepa, expectativas de rendimiento. *Ciencia e Investigación Forestal* 3(6): 37–72.
- Grosse H, V Cubillos. 1991. Antecedentes generales para el manejo de renovales de raulí, roble, coigüe y tepa. Informe Técnico 127, Instituto Forestal, Concepción, Chile.
- Grosse H, I Quiroz. 1999. Silvicultura de los bosques de segundo crecimiento de roble, raulí y coigüe en la región centro-sur de Chile. En: Donoso C, A Lara (Eds.) Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 95–125.
- Hernández R, C Fernández, P Baptista. 1991. Metodología de la Investigación. 2th edition. McGraw-Hill, México, México. 501 p.
- Herrera D, F May. 1976. Caracterización y análisis para el ordenamiento de renovales de raulí en Jauja. Provincia de Malleco. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 63 p.
- Higuera C. 1994. Funciones de volumen y ahusamiento para roble y hualo. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 93 p.
- Hildebrandt P, P Kirchlechner, A Hahn, T Knoke, R Mujica. 2010. Mixed species plantations in southern Chile and the risk of timber price fluctuation. *Eur. J. For. Res.* 129(5): 935–946.
- Husch B, TW Beers, JA Kershaw. 2003. Forest Mensuration. 4th edition. Wiley, New York, USA. 443 p.
- INFOR. 2009. Inventario continuo de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales. Instituto Forestal, Gobierno de Chile, Santiago, Chile. 201 p.
- Innes J. 1992. Structure of evergreen temperate rain forest on the Taitao Peninsula, southern Chile. *J. of Biogeography* 19: 555–562.
- Kahler C. 1993. Determinación de una función de ahusamiento para renovales de roble y raulí. *Ciencia e Investigación Forestal* 7(1): 117–130.
- Kangas A. 2006. Sampling rare populations. In: Kangas A, M Maltamo (Eds.) Forest Inventory, Methodology and Applications. Springer, Dordrecht, The Netherlands, p. 119–139.
- Kawas N. 1978. Estimación de volumen cúbico por árbol con base muestral restringida, para especies forestales nativas. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 98 p.

- Klein D, JP Fuentes, A Schmidt, H Schmidt, A Schulte. 2008. Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative interventions in *Nothofagus pumilio* forests of the Chilean Patagonia. *Forest Ecology and Management* 255(10): 3549–3555.
- Lahsen H. 2003. Caracterización y evaluación de propuestas silvícolas en un renoval intervenido del tipo roble-raulí-coigüe, en el provincia de Ñuble. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. 69 p.
- Landsberg J. 2003. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. *Can. J. For. Res.* 33(3): 385–397.
- Lappi J, RL Bailey. 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters: An alternative to traditional site index methods. *Forest Science* 34: 907–927.
- Lara A, R Villalba. 1993. A 3260-year temperature record from *Fitzroya cupressoides* tree rings in Southern south America. *Science* 260(5111): 1104–1106.
- Lara A, JC Aravena, R Villalba, A Wolodarsky-Franke, B Luckman & R Wilson. 2001. Dendroclimatology of high-elevation *Nothofagus pumilio* forests at their northern distribution limit in the central Andes of Chile. *Can. J. For. Res.* 31(6): 925–936.
- Lara A, C Donoso, P Donoso, P Núñez, A Cavieres. 1999. Normas de manejo para raleo de renovales del tipo forestal roble-raulí-coigüe. En: Donoso C, A Lara (Eds.) *Silvicultura de los bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 129–144.
- Lara A, C Echeverría, C Donoso. 2000. Guía de Ensayos Silviculturales Permanentes en los Bosques Nativos de Chile. LOM Ediciones, Santiago, Chile. 244 p.
- Laroze A. 1994. Modelo de estructura espacial para rodales puros de lenga (*Nothofagus pumilio* Poepp. et Endl., Krasser.). Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 90 p.
- Loetsch F, F Zöhrer, K Haller. 1964. Forest Inventory. v. 1-2. BLV.
- Lusk CH, A Ortega. 2003. Vertical structure and basal area development in second-growth *Nothofagus* stands in Chile. *Journal of Applied Ecology* 40(4): 639–645.
- MacLean CD. 1963. Improving forest inventory area statistics through supplementary photo interpretation. *J. Forestry* 61: 512–516.
- Maltamo M. 2006. Inventories of vegetation, wild berries and mushrooms. In: Kangas A, M Maltamo (Eds.) *Forest Inventory, Methodology and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, p. 141–153.
- Martin M. 2009. Manual de operaciones de terreno. Manual No. 40, Instituto Forestal, Valdivia, Chile.
- Meyer HA. 1940. A mathematical expression for height curves. *J. Forestry* 38(5): 415–420.
- Meyer HA. 1952. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests. *J. Forestry* 50(2): 85–92.
- Moreno P. 2001. Proposición preliminar de curvas de índice de sitio para renovales de Raulí. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 72 p.

- Mujica R. 2001. Untersuchungen zur waldbaulichen Behandlung von *Araucaria araucana* Wäldern in Südkile. Doctor rer. nat. dissertation, Technische Universität München, München, Germany. 190 p.
- Nahuelhual L, J Palma, ME González, K Ortiz. 2008. Potential for greenery from degraded temperate forests to increase income of indigenous women in Chile. *Agroforest Syst* 74: 97–109.
- Navarro C, C Donoso, V Sandoval. 1999. Los renovales de canelo. En Donoso C, A Lara (Eds.) *Silvicultura de los bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, p. 341–377.
- Navarro C, MA Herrera, F Drake, PJ Donoso. 2011. Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. *Bosque* 32(2): 175– 86.
- Núñez P, R Peñaloza. 1986. Estudio evaluación del estado actual y proposición de manejo de los renovales de raulí y roble intervenidos en los predios Jauja y Santa Luisa, de FORVESA. Etapa II: Resultados del inventario de pre-raleo. Serie técnica, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, Chile. 101 p.
- Núñez P, C Salas. 2000. Estudio dendrométrico proyecto forestal Río Cóndor, Tierra del Fuego, XII Región, Chile. Documento de circulación restringida, Forestal Savia Ltda., Temuco, Chile. 43 p.
- Olivares B. 1977. Modelos de simulación y su empleo en el manejo forestal. *Bosque* 1(1): 32–40.
- Olson DM, E Dinerstein. 1998. The global 200: A representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology* 12(3): 502–515.
- Ortega A, S Gezán. 1998a. Cuantificación de crecimiento y proyección de calidad en *Nothofagus*. *Bosque* 19(1): 123–126.
- Ortega A, S Gezán. 1998b. Relación entre variables silviculturales y modelamiento en renovales de *Nothofagus*: una propuesta. In Primer Congreso Latinoamericano IUFRO. Valdivia, Chile.
- Pedraza R. 2003. Evaluación de propuestas de intervención silvícola en un bosque del tipo forestal roble - raulí - coihue subtipo remanente original alterado, en la comuna de Panguipulli, décima región. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. 80 p.
- Peters R. 1971. Konstruktion eines massentafelmodells dargestellt am beispiel der baumart *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch. Doctorwürde dissertation, Albert-Ludwig-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg, Germany. 93 p.
- Peters R. 1983. Modelos de rodal y de manejo de plantaciones. In UACH (Ed.) Simposio: Desarrollo y perspectivas de las disciplinas forestales en la Universidad Austral de Chile. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile., p. 283–313.
- Pollmann W. 2003. Stand structure and dendroecology of an old-growth *Nothofagus* forest in Conguillío National Park, south Chile. *Forest Ecology and Management* 176: 87–103.
- Prado JA, R Peters, S Aguirre. 1986. Biomass equations for quillay *Quillaja saponaria* Mol in the semiarid region of central Chle. *Forest Ecology and Management* 16: 41–47.

- Pretzsch H, P Biber, J Durský, K von Gadow, H Hasenauer, G Kändler, G Kenk, E Kublin, J Nagel, T Pukkala, JP Skovsgaard, R Sadtke, H Sterba. 2002. Recommendations for standardized documentation and further development of forest growth simulators. *Forstw. Cbl.* 121(3): 138–151.
- Prodan M, R Peters, F Cox, P Real. 1997. Mensura Forestal. Serie investigación y educación de desarrollo sostenible. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura (IICA)/BMZ/GTZ, San José, Costa Rica. 561 p.
- Puente M. 1980. Utilización de un bosque del tipo forestal araucaria con criterios de permanencia. Boletín Técnico No. 57, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 22 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.
- LeQuesne CE, D Stahle, M Cleaveland, M Therrel, JC Aravena, J Dunn, J Barichivich. 2006. Ancient Cipres tree-ring chronologies used to reconstruct Central Chile precipitation variability from A.D. 1200-2000. *Journal of Climate* 19: 5731–5744.
- Quintana A. 2008. Biomasa aérea y contenido de carbono en una plantación de siete años de *Quillaja saponaria* Mol. del secano interior de Chile central. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 75 p.
- Quiroz I. 1990. Funciones de volumen, modelos de crecimiento factor de forma para *Drymis winteri* Forst. *Ciencia e Investigación Forestal* 4(2): 228–236.
- R Development Core Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Real P. 1977. Algunas relaciones dendrométricas básicas para inventarios en bosques naturales. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 85 p.
- Reese H, M Nilsson, P Sandström, H Olsson. 2002. Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37: 37–55.
- Reineke LH. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *The Journal of Agricultural Research* 46(7): 627–638.
- Rennolls K, M Tomé, JK Vanclay, V LeMay, BT Guan, GZ Gertner. 2007. Potential contributions of statistics and modelling to sustainable forest management: review and synthesis. In: Reynolds K, A Thomson, M Shannon, M Kohl, D Ray, K Rennolls (Eds.) Sustainable Forestry: From Monitoring and Modelling to Knowledge Management and Policy Science. CABI Publishing, Oxon, England, p. 314–341.

- Robinson AP, WR Wykoff. 2004. Imputing missing height measures using a mixed-effects modeling strategy. *Can. J. For. Res.* 34: 2492–2500.
- Rosenfeld JM, RM Navarro, JR Guzman. 2006. Regeneration of *Nothofagus pumilio* [Poepp. et Endl.] Krasser forests after five years of seed tree cutting. *Journal of Environmental Management* 78(1): 44–51.
- Rustagi KR. 1978. Predicting stand structure in evenaged stands. In J. Fries, Harold E. Burkhart and Timothy A. Max (Ed.) Growth Models for Long Term Forecasting of Timber Yields. Proceedings from an IUFRO meeting, division 4, FWS-1-78. School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Inst and State University, Blacksburg, VA, USA, p. 193–1208.
- Saket M. 2002. Gaps in national-level information on forests and trees in developing countries. *Unasylva* 53: 24–27.
- 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. 2008. Sugerencias para mejorar la calidad de las revistas científicas chilenas: una aplicación en las ciencias forestales con Bosque. *Bosque* 29(1): 3–10.
- 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, L Ene, N Ojeda, H Soto. 2010. Métodos estadísticos paramétricos y no-paramétricos para predecir variables de rodal basados en Landsat ETM+: una comparación en un bosque de Araucaria araucana en Chile. *Bosque* 31(3): 179–194.
- Salas C, O García. 2006. Modelling height development of mature *Nothofagus obliqua*. *Forest Ecology and Management* 229(1-3): 1–6.
- 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.
- Sandoval V. 1993. Inventario forestal bietápico-bifásico combinado. *Bosque* 14(1): 29–36.
- Santelices R. 1989. Funciones de volumen, factor de forma y modelos de crecimiento diametral para rodales de lingue y mañío. *Ciencia e Investigación Forestal* 2(7): 1–19.
- Scheuber M, M Köhl. 2003. Assessment of non-wood-goods and services by cluster sampling. In: Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring, Eds. Corona, Köhl, Marchetti. Kluwer Publishers. P: 157-171
- Schlatter JE. 1994. Requerimientos de sitio para la lenga, *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser. *Bosque* 15(2): 3–10.
- Schlatter JE, V Gerding. 1995. Método de clasificación para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque* 16(2): 13–20.
- Schlegel BC, PJ Donoso. 2008. Effects of forest type and stand structure on coarse woody debris in old-growth rainforests in the Valdivian Andes, South-Central Chile. *Forest Ecology and Management* 255: 1906–1914.

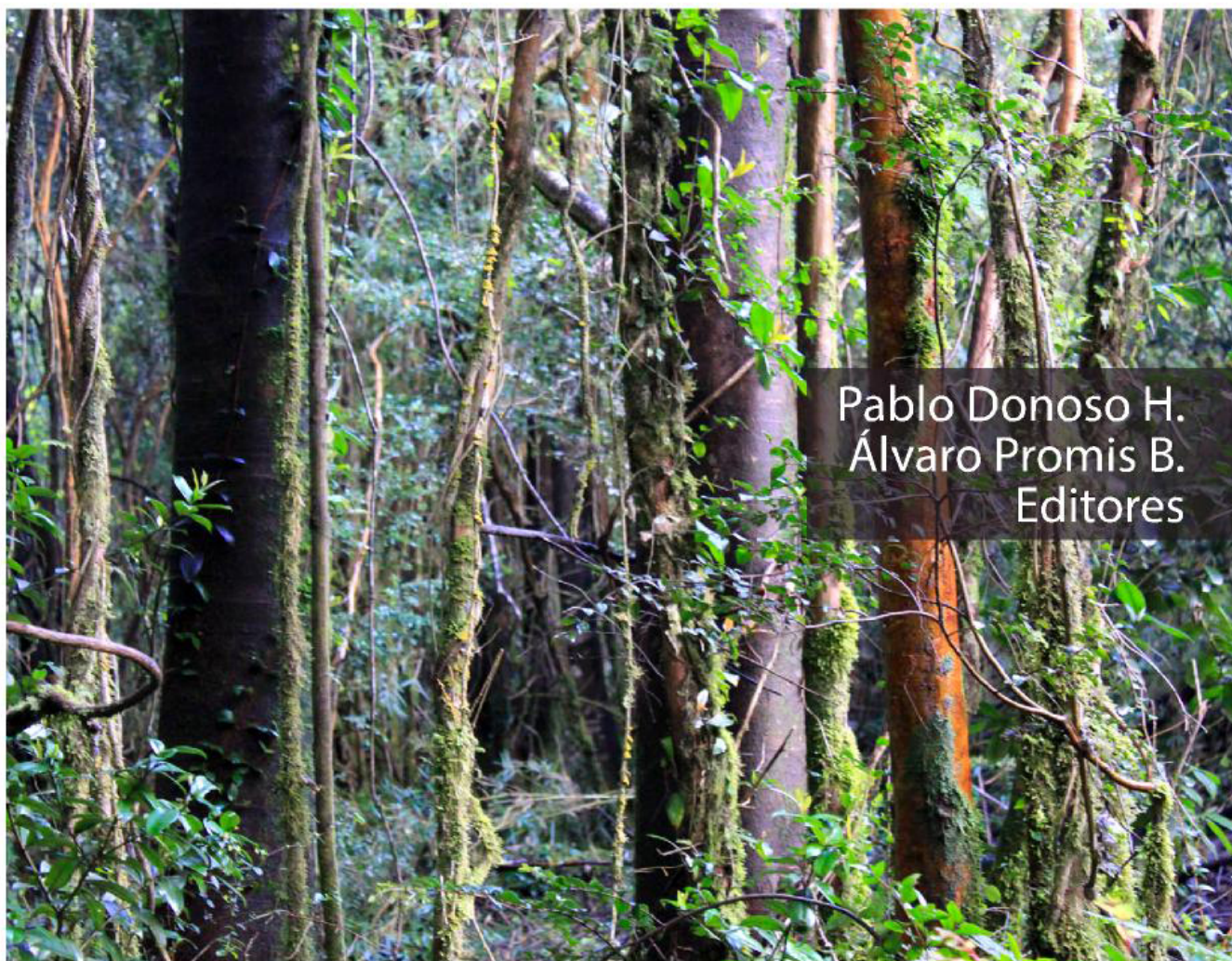
- Schmidt H, J Caldentey. 1994. Silvicultura de los bosques de lenga, apuntes del tercer curso. Technical report, Corporación Nacional Forestal Región de Magallanes, Corporación Chilena de la Madera A.G, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 95 p.
- Schumacher FX. 1945. Statistical method in forestry. *Biometrics Bulletin* 1(3): 29–32.
- Shiue C, HH John. 1962. A proposed sampling design for extensive forest inventory: Double systematic sampling for regression with multiple random starts. *J. Forestry* 60: 607–610.
- Smith DM (1962) The Practice of Silviculture. 7th edition. Wiley & Sons, New York, USA. 578 p.
- Soler M (1978) Análisis evolutivo y comportamiento de renovales no intervenidos de raulí (*Nothofagus alpina* Poepp. et Endl) según edad. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 51 p.
- Soto DP, C Salas, PJ Donoso, D Uteau. 2010. Heterogeneidad estructural y espacial de un bosque mixto dominado por *Nothofagus dombeyi* después de un disturbio parcial. *Rev. Chilena de Historia Natural* 83(3): 335–347.
- Stage AR. 1963. A mathematical approach to polymorphic site index curves for grand fir. *Forest Science* 9(2): 167–180.
- Stage AR. 1973. Prognosis model for stand development. Res. Pap. INT-137, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 32 p.
- Stattersfield AJ, MJ Crosby, AJ Long, DC Wege. 1998. Endemic bird areas of the world: Priorities for biodiversity conservation. Birdlife International, Cambridge, UK.
- Staudhammer C, VM LeMay. 2000. Height prediction equations using diameter and stand density measures. *For. Chron.* 76(2): 303–309.
- Tacón A. 2004. Manual de productos forestales no madereros. Programa de Fomento para la Conservación de Tierras Privadas de la Décima Región, CIPMA, Valdivia, Chile. 22 p.
- Tacón A, J Palma, U Fernández, F Ortega. 2006. El Mercado de los Productos Forestales No Madereros y la Conservación de los Bosques del Sur de Chile y Argentina. WWF Chile, Valdivia, Chile. 96 p.
- Temesgen H, ME Goerndt, GP Johnson, DM Adams, RA Monserud. 2007. Forest measurement and biometrics in forest management: Status and future needs of the Pacific Northwest USA. *J. Forestry* 105(5): 233–238.
- Thiers O. 2004. Roble (*Nothofagus obliqua* [Mirb.] Oerst.)- sekundärwälder in zentral- und südchile: Bestimmung der für die bestandesproduktivität wichtigen standortsfaktoren. Doctor rer. nat. dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg, Germany. 170 p.
- Thiers O, V Gerding. 2007. Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en el suroeste de Tierra del Fuego, Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural* 80: 201–211.
- Thomas CE, BR Parresol. 1991. Simple, flexible, trigonometric taper equations. *Can. J. For. Res.* 21: 1132–1137.
- Thorey LG. 1932. A mathematical method for the construction of diameter height curves based on site. *For. Chron.* 8(2): 121–132.

- Tomppo E. 1991. Satellite image-based national forest inventory of Finland. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 28(5): 419–424.
- Trincado G, A Kiviste, K von Gadow. 2002. Preliminary site index models for native roble (*Nothofagus obliqua*) and raulí (*N. alpina*) in Chile. *N. Z. J. For. Sci.* 32(3): 322–333.
- Trincado G, J Vidal. 1999. Aplicación de interpolación cúbica “spline” en la estimación de volumen. *Bosque* 20(2): 3–8.
- Uriarte A, H Grosse. 1991. Los bosques de lenga una orientación para su uso y manejo. Informe Técnico 126, Instituto Forestal, Santiago, Chile.
- Vallejos J. 1976. Estimación de parámetros lineales en funciones de volumen cúbico. Análisis comparativo. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 129 p.
- van Laar A, A Akça. 1997. Forest Mensuration. Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany. 418 p.
- van Laar A, A Akça. 2007. Forest Mensuration. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 383 p.
- Vancly JK. 1994. Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, Wallingford, Berkshire, England. 312 p.
- Veblen TT, DH Ashton. 1978. Catastrophic influences on the vegetation of the Valdivian Andes, Chile. *Vegetatio* 36(3): 149–167.
- Veblen TT, DH Ashton, FM Schlegel. 1979. Tree regeneration strategies in a lowland *Nothofagus*-dominated forest in south-central Chile. *J. of Biogeography* 6(4): 329–340.
- Veblen TT, DH Ashton, FM Schlegel, A Veblen. 1978. Influencia del estrato arbóreo sobre los estratos inferiores en un bosque mixto, perenni-caducifolio de Antillanca, Osorno, Chile. *Bosque* 2(2): 88–104.
- Veblen TT, C Donoso. 1987. Alteración natural y dinámica regenerativa de las especies chilenas de *Nothofagus* de la Región de Los Lagos. *Bosque* 8(2): 133–142.
- Veblen TT, C Donoso, FM Schlegel, B Escobar. 1981. Forest dynamics in south-central Chile. *J. of Biogeography* 8(3): 211–247.
- Veblen TT, RS Hill, J Read (Eds.). 1996. The Ecology and Biogeography of *Nothofagus* Forests. Yale University Press, New Haven, CT. 428 p.
- Veblen TT, FM Schlegel, B Escobar. 1980. Structure and dynamics of old-growth *Nothofagus* forests in the Valdivian Andes, Chile. *J. of Ecology* 68(1): 1–31.
- Vergara N. 1982. Distribuciones diamétricas en renovales no intervenidos de Raulí (*Nothofagus alpina* Poepp et Endl.). Tesis Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 149 p.
- von Bertalanffy L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *The Quarterly Review of Biology* 32(3): 217–231.
- Weibull W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.-Trans. ASME* 18(3): 293–297.
- Wienstroer M, H Siebert, B Müller-Using. 2003. Competencia entre tres especies de *Nothofagus* y *Pseudotsuga menziesii* en plantaciones mixtas jóvenes, establecidas en la precordillera andina de Valdivia. *Bosque* 24(3): 17–30.

- Wilcox K. 1995. Chile's Native Forests: A Conservation Legacy. Ancient Forest International, Redway, CA, USA.
- Winberger P, C Ramírez. 1999. Sinecología de la regeneración natural del raulí (*Nothofagus alpina*) Fagaceae, Magnoliopsida. *Rev. Chilena de Historia Natural* 72: 337–351.
- Yoda K, T Kira, H Ogawa, K Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. (inter-specific competition among higher plants xi). *J Biol Osaka City Univ.* 14: 107–129.
- Zeide B. 1980. Plot size optimization. *Forest Science* 26(2): 251–257.
- Zeide B. 1991. Quality as a characteristic of ecological models. *Ecological Modelling* 55: 161–171.
- Zöhrer F. 1987. Forstinventur. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Pareys Studentexte 26. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, Germany. 207 p.

Silvicultura en Bosques Nativos

Avances en la investigación
en Chile, Argentina y Nueva Zelandia



Pablo Donoso H.
Álvaro Promis B.
Editores

Estudios en Silvicultura de Bosques Nativos Vol. 1

SILVICULTURA EN BOSQUES NATIVOS

AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN EN
CHILE, ARGENTINA Y NUEVA ZELANDIA

PABLO DONOSO H. – ÁLVARO PROMIS B.
EDITORES

Primera Edición 2013

© PABLO DONOSO H. Y ÁLVARO PROMIS B.

Diseño Portada: Vicente Donoso R.

Diagramación: María E. Ramírez R.

Edición a cargo de:

Marisa Cuneo Ediciones

Fono: 56-63 2212323 Valdivia, Chile

RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS

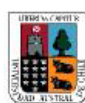
Impreso en Chile / Printed in Chile

Registro de Propiedad Intelectual N° 235.671

ISBN: 978-956-7173-32-7

Este libro es el resultado final de un encuentro de investigadores en silvicultura de distintos centros de investigación de Chile, Argentina y Nueva Zelandia, el que fue celebrado en la primavera del año 2011. Los capítulos abordan investigaciones en silvicultura en bosques nativos en estos países, y temáticas sobre biometría y herramientas de gestión para la silvicultura en Chile. Nuestro fin último, al que creemos haber contribuido, es relevar la importancia de fortalecer la ciencia de la silvicultura de bosques nativos como clave para la conservación de éstos en Chile. En este sentido nuestro encuentro terminó con el planteamiento de algunos desafíos relacionados con la silvicultura de los bosques nativos, los que incluyeron la necesidad de (1) incrementar los estudios en silvicultura de los bosques nativos, con más investigadores y parcelas permanentes y demostrativas, y (2) generar un mayor acercamiento de los investigadores con los distintos actores relevantes del sector forestal, incluyendo por cierto a las autoridades y legisladores sectoriales.

Un compromiso fundamental adquirido fue que ésta será una serie periódica de libros sobre investigaciones en Silvicultura de Bosques Nativos en el Cono Sur. Con ello queremos contribuir a que, como dice uno de nuestros colegas extranjeros en este libro, la investigación brinde las herramientas necesarias para alcanzar un manejo sostenible por parte de los usuarios de bosques, y sea un aporte a una efectiva implementación de las leyes desarrolladas para fomentar el buen uso de los bosques nativos.



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
TEMUCO



UNIVERSIDAD
CATOLICA
DEL MAULE



chagual
JARDIN BOTANICO
DE SANTIAGO