

ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DIAMETRAL EN RENOVALES DE

Nothofagus obliqua A PARTIR DEL DIÁMETRO NORMAL

Patricio Corvalán y Américo Contreras

RESUMEN

El crecimiento anual en diámetro periódico (CAP) resulta fundamental para estudiar, planificar o proponer estrategias de manejo del bosque, para lo cual es necesario disponer de modelos de crecimiento. El objetivo de este estudio fue ajustar un modelo estimador del CAP en diámetro normal sin corteza (DAP) para renovales de la especie *Nothofagus obliqua* en función de su estado al inicio del período de crecimiento, usando como predictores al DAP y el percentil de DAP en la parcela a la cual

pertenece (Per). El modelo final arrojó una relación lineal del CAP positiva con el inverso del DAP y con el Per, resultando así en mayores tasas de crecimiento en árboles de menores DAP y de mayor Per. La variación explicada por las variables alcanza al 51% de la variación total y con una raíz del error medio cuadrático de 0,1152cm resultando en un modelo parsimonioso. La inclusión del percentil de DAP es una variable que explica significativamente el crecimiento anual en diámetro.

Introducción

Nothofagus obliqua (Mirb.) Oerst., comúnmente llamado 'roble pellín' o 'roble', se distribuye entre 33°00' y 41°30'S, ocupando en Chile la cordillera de la Costa, la Depresión Central y la vertiente oeste de la Cordillera de Los Andes, así como la vertiente este de esta última en el lado Argentino (Donoso *et al.*, 2004). Los bosques septentrionales dominados por esta especie alcanzan las 305.000ha, y corresponden en su mayoría a bosques secundarios no manejados (Corvalán, 2015).

Para la evaluación de estrategias de manejo es deseable disponer de modelos de simulación de crecimiento debidamente validados y acordes al nivel de detalle con que se pretende usar (Ivancich *et al.*, 2014; Salas *et al.*, 2016). En general, los modelos de crecimiento más utilizados son aquellos independientes de distancia y que utilizan el diámetro normal (DAP) y

algún otro atributo que dé cuenta de su posición relativa de competencia en el rodal (Morales *et al.*, 1979).

El crecimiento anual periódico en diámetro o radio (CAP) ha sido un tema central de estudio en dendrometría (Husch *et al.*, 2002). Adame *et al.* (2008) establecieron que las variables más significativas en la predicción del CAP en renovales de *Quercus pyrenaica* en el noroeste de España fueron el DAP, el área basal por hectárea de los árboles de mayor DAP que el árbol en estudio, la altura dominante del rodal, el índice de sitio y el estrato biogeoclimático. Para el género *Nothofagus* existen trabajos donde se relaciona el crecimiento con algunas variables dasométricas y ambientales. Para *N. obliqua*, Chauchard y Sbrancia (2003) utilizando parcelas permanentes, análisis fustal y tarugos de incremento determinaron que las tasas de crecimiento promedio por clases diamétricas se relacionan inver-

samente con el tamaño inicial del árbol (DAP) y positivamente con su grado de dominancia. Attis Beltrán *et al.* (2013) establecieron para *N. pumilio* en Argentina que el crecimiento se relaciona con el estado sanitario de los árboles a lo largo de gradientes de calidad de sitio, de clases de copa y de edad, respondiendo con mayores tasas de crecimiento en sitios buenos, árboles dominantes, edades juveniles y árboles sanos.

La inclusión de variables adicionales al DAP en la estimación del CAP, tales como el sitio, índices de competencia, edad y estado sanitario, muchas veces resultan ineficientes, por cuanto son muy costosas de medir y no están exentas de error, especialmente cuando se utilizan mediciones subjetivas (Monserud y Sterba, 1996). Ivancich *et al.* (2014) demuestran en *N. antarctica* que los modelos de crecimiento con muchas variables no mejoran la precisión en relación con modelos

más simples, aun cuando proveen una mejor comprensión e interpretación de los fenómenos biológicos. Estos autores también determinan que el crecimiento de los árboles se ordena en forma decreciente con la dominancia y la clase de sitio.

La posición social de los individuos en el tiempo es un factor crítico en el desarrollo del crecimiento de los árboles (Medhurst *et al.*, 2001; Lusk, 2004; Janse-Ten *et al.*, 2007). Palik y Pregitzer (1993) demuestran que las especies menos tolerantes a la sombra (como *N. obliqua*) presentan altas tasas de crecimiento inicial y definen muy prontamente su posición social, como lo señala Sutton (1973) en *Pinus radiata* y Chauchard y Sbrancia (2003) en *N. obliqua*. Esta condición puede ser considerada más estable en especies intolerantes que en tolerantes (Palik y Pregitzer, 1993); en este sentido, la movilidad social en especies tolerantes puede cambiar en el

PALABRAS CLAVE / Crecimiento Anual Periódico / Diámetro Normal / *Nothofagus obliqua* / Posición Social /

Recibido: 28/11/2017. Modificado: 19/07/2018. Aceptado: 21/07/2018.

Patricio Corvalán. Ingeniero Forestal y Magister en Ciencias Forestales, Universidad de Chile (UChile). Profesor,

UChile. Dirección: Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, UChile. Av. Santa Rosa 11315,

La Pintana, Santiago, Chile. e-mail: pcorvala@uchile.com
Américo Contreras. Ingeniero Agrónomo y Magister en Cien-

cias Agronómicas, UChile. Profesor, UChile. e-mail: a.contreras@uchile.cl

ESTIMATION OF DIAMETRAL GROWTH IN SECONDARY BEECH FORESTS FROM MEASUREMENT OF DIAMETERS IN TRADITIONAL PLOTS

Patricio Corvalán and Américo Contreras

SUMMARY

The periodic annual growth in diameter (CAP) is essential to study, plan or propose forest management strategies, and growth models are necessary to understand it. The aim of this work was to create a model to estimate CAP from diameter at breast height (DAP) for secondary forests of the *Nothofagus obliqua* according to their status at the beginning of the growth period, using DAP and the percentile of DAP inside the plot to which it belongs (Per) as predictors. The

final model showed a linear relationship between CAP and the inverse of DAP (1/DAP) and with Per, resulting in higher growth rates in trees with lower DAP and higher Per. The variation explained by the variables reaches 51% of the total variation and with the root of the mean square error of 0.1152cm, resulting in a parsimonious model. The inclusion of the DAP percentile is a variable that significantly explains the annual growth in diameter.

ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DIAMETRAL EM RENOVAÇÕES DE *Nothofagus obliqua* DO DIÂMETRO NORMAL

Patricio Corvalán e Américo Contreras

RESUMO

O crescimento anual periódico em diâmetro (CAP) é essencial para estudar, planejar ou propor estratégias de manejo florestal, para as quais é necessário ter modelos de crescimento. O objetivo foi ajustar um modelo de estimador CAP em diâmetro normal sem casca (DAP) para renovações das espécies de *Nothofagus obliqua* de acordo com seu status no início do período de crescimento, utilizando como preditores o DAP e o percentil DAP na parcela para a que pertence (Per). O mode-

lo final apresentou uma relação linear do CAP positivo com o inverso do DAP e com o Per, resultando em maiores taxas de crescimento em árvores com menor DAP e maior Per. A variação explicada pelas variáveis atinge 51% da variação total e com a raiz do erro quadrático médio de 0,1152cm, resultando em um modelo parcimonioso. A inclusão do percentil DAP é uma variável que explica significativamente o crescimento anual em diâmetro.

largo plazo, como lo demuestran Cherubini *et al.* (1998). Para proyecciones de corto plazo en rodales coetáneos e intolerantes la movilidad social es baja (Chauchard y Sbrancia, 2003).

La diferencia en CAP se explica fundamentalmente por el tamaño inicial (DAP) y su posición en la competencia en el rodal (Monserud y Sterba, 1996). Los árboles de mayor tamaño en rodales coetáneos e intolerantes son en su mayoría árboles dominantes y codominantes, como lo señalan Zasada y Cieszewski (2005). Esta relación entre dominancia y tamaño puede ser explicada por la posición ordinal del DAP del árbol en el rodal. Los árboles ubicados en los percentiles de DAP superiores del rodal serán en su mayoría dominantes y codominantes, tendrán diferentes condiciones de competencia y tasas de crecimiento que los árboles de percentiles inferiores. De igual forma, árboles de diferente DAP y condiciones de creci-

miento podrán presentar CAP similares.

En el presente trabajo se analiza si los crecimientos diametrales (CAP) pueden ser modelados en función de su DAP pasado y de la posición ordinal o percentil de DAP al cual pertenece dentro de la unidad de muestreo o parcela (Per). Aquí se sustituye el concepto de posición social por el de percentil de DAP, el que queda determinado una vez medidos todos los árboles de la parcela.

Materiales y Métodos

Ubicación y descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la precordillera de Curicó, Chile, en la cuenca del estero Upeo y abarca una superficie de ~1300ha en exposición predominantemente sur. El área se encuentra entre los 700 y 1300msnm y corresponde a un mosaico de bosques secundarios que se originaron por la tala de los bosques primarios

en la mitad del siglo XX y por posteriores cortas sucesivas de pequeñas superficies de bosque para la producción de carbón y leña. De ahí su formación como mosaico de bosques coetáneos secundarios no manejados (Corvalán, 2015).

Desde el punto de vista morfogénico, la formación de la precordillera es producto de materiales de depósitos de morrenas, acarreo fluviales y glaciofluviales, además de algunos depósitos lacustres y glaciolacustres que han sido cubiertos por capas de cenizas volcánicas. El suelo presenta una textura franco-limosa, de alto contenido orgánico y baja disponibilidad de fósforo y nitrógeno (CONAF, 1999; Corvalán, 2015).

El sector estudiado se encuentra dentro de la zona bioclimática templada sub-mediterránea, presentando una precipitación media anual de 1000mm concentradas entre abril y octubre. Las temperaturas medias oscilan entre los 8°C en los meses más fríos y los 18°C en

los meses más cálidos (Ceballos, 2015).

La vegetación presente en el área de estudio es la de los tipos forestales Roble-Hualo y Ciprés de la Cordillera (Donoso, 2007; Corvalán *et al.*, 2014a). Una descripción completa de la flora vascular del sector puede ser consultada en Ceballos (2015).

Medición de crecimiento

El estudio se llevó a cabo en rodales de segundo crecimiento, en su mayoría con estructura de monte bajo irregular coetáneo originado por la corta del bosque primario. La estructura forestal fue descrita previamente por Corvalán (2015). El muestreo se realizó en rodales con diferentes situaciones de densidad y altura de acuerdo con modelos de cobertura de copa construidos a partir de datos LiDAR. Asimismo, los sitios de muestreo se limitaron a sectores con pendiente inferior a 45%, tener al menos un 60% de individuos de *N. obli-*

qua y con un mínimo de 100 árboles/ha.

Las unidades de muestreo seleccionadas fueron 73 parcelas de superficie mínima de 200m² con forma variable (circulares o poligonales). En cada una de ellas se midieron todos los árboles de la parcela con DAP ≥ 10cm. Fueron ordenados en forma creciente de DAP y al árbol central de cada cuartil de la muestra se le extrajo con taladro de incremento un tarugo en dirección hacia el centro de la parcela. Estos tarugos fueron secados, pegados sobre una base de madera con vaciado de 4mm de diámetro y lijados con distinto grano hasta distinguir macroscópicamente los anillos anuales para la determinación del crecimiento. Algunos tarugos de los cuartiles inferiores fueron desechados por no alcanzar al final del período un diámetro mínimo de 10cm. La lectura de anillos se realizó con lupa electrónica USB Digital Microscope BW 400X (Farnell, RU). La medición de espesor de corteza se realizó en verde, al momento de extraer el tarugo. El período de crecimiento estudiado fue entre el fin de verano del 2007 y el fin de verano del 2012. El crecimiento diametral corresponde a la diferencia entre los diámetros sin corteza estimada a fines del año 2012 y 2007 y el crecimiento anual periódico (CAP) corresponde al crecimiento diametral dividido por cinco años.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados a través de modelos lineales mixtos según la definición:

$$y = X\beta + Zu + e \quad (1)$$

donde y: vector respuesta; X: matriz de incidencia de los efectos fijos, considerándose en un principio la inclusión en ella de las variables 'percentil' y 'diámetro a la altura de pecho, DAP'; β: vector de efectos fijos; Z: matriz de incidencia de los efectos aleatorios, representando a cada una de las parcelas analizadas, u: vector de efectos aleatorios; y e: vec-

tor de errores. Los supuestos del modelo, en primera instancia fueron:

$$u \sim N(0, \psi) \text{ y } e \sim N(0, e^2 I) \quad (2)$$

Como efectos fijos fueron considerados el diámetro a la altura de pecho (DAP), y los percentiles (Per) a los cuales pertenecen cada uno de los árboles presentes en las parcelas analizadas. La variable respuesta correspondió al CAP. Con el fin de considerar las estructuras de correlación presentes en las parcelas, estas fueron consideradas como efectos aleatorios. Se estudió el posible comportamiento curvilíneo en las variables analizadas de forma independiente, tal como sugieren Larsen y McLeary (1976) en modelos de regresión múltiple, a través de los residuos parciales, según la expresión:

$$r_i^* = r + X_i \hat{\beta}_i \quad (3)$$

donde r_i^{*}: i-ésimo residuo parcial; r: residuos del modelo; X_i: i-ésima columna de la matriz de incidencia de los efectos fijos; y β_i: parámetro estimado del i-ésimo efecto fijo del modelo, estimado previamente con todos los efectos fijos de interés.

La verificación de los supuestos del modelo se realizó a través de herramientas gráficas, tales como gráficos qq-plot para la verificación del supuesto de normalidad, y gráficos de residuos estandarizados de Pearson vs los valores predichos del modelo para el supuesto de homogeneidad de varianza. Al momento de modelar los datos, se observaron posibles violaciones en los supuestos de homogeneidad de varianza, por lo que se propuso formular un modelo lineal mixto extendido,

tal como lo proponen Pinheiro y Bates (2000). Este tipo de modelación admite, mediante la utilización de funciones de varianza, una flexibilización de los supuestos previamente definidos, permitiendo corregir problemas heterocedásticos y considerar estructuras de correlación dentro de grupos. Estos nuevos supuestos distribucionales son:

$$u \sim N(0, \psi) \text{ y } e \sim N(0, \sigma^2 \Lambda) \quad (4)$$

donde Λ: matriz definida positiva, parametrizada por un número pequeño de parámetros λ (Pinheiro y Bates, 2000). Además la covarianza entre u y e = 0. El modelo propuesto es el mismo definido en la Ec. 1. Las tres propuestas consideraron la utilización de un modelo homocedástico, y dos modelos heterocedásticos que consideran diferentes funciones de varianza, las cuales se detallan en la presentación de los resultados.

La selección del mejor modelo propuesto se basó en la utilización del *Bayesian Information Criterion* (BIC) y el *Akaike Information Criterion* (AIC), definidos como:

$$AIC = -2 \ln \text{Lik} + 2n_{\text{par}} \quad (5)$$

$$BIC = -2 \ln \text{Lik} + n_{\text{par}} \text{Log}(N) \quad (6)$$

donde Lik: valor maximizado de la función de verosimilitud, n_{par}: número de parámetros en el modelo, y N: total de observaciones usadas para realizar el ajuste. Bajo esta definición se considera que mientras más bajo sea el valor obtenido, y manteniendo sin alterar el número de observaciones y la parte fija, mejor es el modelo. Junto a lo anterior, se presenta de forma complementaria las estimacio-

nes del coeficiente de determinación (R² ajustado, tanto marginal como condicional a los efectos aleatorios) para todos los modelos lineales mixtos estimados, según lo propuesto por Nakagama y Shielzeth (2013), y así como la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés).

Validación

Con el fin de evaluar el ajuste de las variables propuestas es que en una primera instancia se construyeron dos modelos lineales. El primero incluyó el DAP (considerado en este primer modelo como 1/DAP, dado su comportamiento curvilíneo), más los efectos aleatorios de parcela, y un segundo modelo, el cual incluyó el efecto del 1/DAP y percentil, más los efectos aleatorios de parcela. A ambos modelos se les realizó una validación cruzada del tipo *k-fold* (*k-fold cross-validation*; k=10) realizando las correspondientes 10 iteraciones y validaciones. Para cada modelo se estimó el R² según lo propuesto por Nakagama y Shielzeth (2013) y la correspondiente estimación de la raíz del error cuadrático medio (RMSE *k-fold*) con el fin de seleccionar, en una primera instancia, el mejor de ambos modelos.

Todos los análisis fueron realizados a través del lenguaje de programación R (R core Team, 2016)

Resultados

Los resultados de las validaciones cruzadas sugieren que el modelo que incluye la variable percentil genera aumentos en el R², tanto marginal como condicional, y disminución de RMSE obtenido luego de la validación *k-fold* (Tabla 1), por

TABLA I
ESTIMACIÓN DE R²-MARG, R²-COND Y RMSE OBTENIDO DE LA VALIDACIÓN K-FOLD, EN EL MODELO QUE NO INCLUYE LA VARIABLE 'PERCENTIL' (MODELO 1) Y EL MODELO QUE LA INCLUYE (MODELO 2)

Modelo	R ² -marg	R ² -cond	RMSE (<i>k-fold</i>)
y = 1 + 1/DAP + (1 Parcela)	0,017	0,30	0,1361
y = 1 + 1/DAP + percentil + (1 Parcela)	0,31	0,51	0,1152

R² marg: coeficiente de determinación sin considerar los efectos aleatorios. R² cond: coeficiente de determinación condicionados a los efectos aleatorios. RMSE: raíz error cuadrático medio.

lo que se decidió incorporar a esa variable en el modelo, siendo ambas variables estadísticamente significativas.

Al momento de estudiar el comportamiento de cada una de las variables a incluir en el modelo definitivo mediante la gráfica de sus residuos parciales (Larsen y McCleary, 1972) se observó nuevamente el comportamiento curvilíneo entre la relación del DAP vs el incremento, lo que fue corregido nuevamente de forma exitosa utilizando la transformación de la variable DAP en 1/DAP. La relación observada entre el incremento y los percentiles mostró un comportamiento lineal, por lo que no fue necesario realizar ninguna transformación. Con respecto a la verificación de los supuestos del modelo se pudo identificar, a través de los residuos parciales, problemas heterocedásticos, principalmente en esa última variable, por lo que se propusieron tres modelos, uno homocedástico (según las Ecs. 1 y 2 definidas previamente) y dos modelos heterocedásticos, utilizando funciones de varianza, del tipo varIdent y varExp (Pinheiro y Bates, 2000).

Como nivel de estratificación se consideraron los valores ajustados del modelo. El diag-

nóstico anterior sugirió que el modelo que considera una función de varianza del tipo varExp fue el más recomendado, dado que presentó los valores más bajos de AIC y BIC (Tabla II), procediéndose a estimar sus parámetros. La Tabla III muestra la estimación de cada uno de los parámetros incluidos en el modelo y su significancia, obteniéndose que tanto 1/DAP como la variable percentil fueron estadísticamente significativos, siendo considerados en el modelo final.

Luego el modelo puede expresarse, en función de la parte fija, como:

$$\hat{C\Delta P} = -0,0880478 + 2,0021812 \times (1/DAP) + 0,0033458 \times \text{percentil}$$

La estimación de los parámetros sugiere que, en la medida que 1/DAP y Per tienen incrementos en sus valores, estos repercuten de manera positiva en la estimación que tienen los incrementos en las mediciones de los árboles. La Figura 1 muestra un gráfico de los valores ajustados y los observados del modelo, observándose un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,67, indicando una correlación media entre ambas variables.

Al observar la Figura 1, la alta dispersión de los datos puede deberse a la falta de inclusión de variables en el modelo. Tanto la variable 1/DAP como la medición de los percentiles fueron evaluadas.

Discusión

Los resultados de este trabajo están de acuerdo con los logrados por Chauchard y Sbrancia (2003) en *N. obliqua* creciendo en la Reserva Nacional del Parque Nacional Lanín, Argentina. La tendencia del crecimiento diametral en DAP es decreciente a medida que éste aumenta, luego de alcanzar un valor máximo en diámetros pequeños típicos de especies intolerantes. También estos autores establecen que los estratos sociales superiores presentan mayor incremento diametral que los estratos inferiores, en analogía con lo encontrado en este estudio respecto de los percentiles de diámetro y con lo reportado por Attis Beltrán *et al.* (2013) en *N. pumilio*. El supuesto de considerar constante el percentil de diámetro para predicciones de crecimiento en períodos cortos de vida se ve reforzado por el trabajo de Chauchard y Sbrancia (2003), al concluir que *N. obliqua* define su posición social y su tendencia al desarrollo en la fase juvenil, y puede mantenerse creciendo en los estratos dominante e intermedio hasta la fase de madurez. Los valores absolutos de crecimiento anual periódico presentados por Chauchard y Sbrancia (2003) son siempre superiores a los encontrados en

el presente trabajo, en concordancia con la diferencia de latitudes de ambos trabajos.

La inclusión de 15 variables de estado y de competencia del árbol y de rodal para predecir el incremento anual corriente en DAP reportadas por Moreno *et al.* (2017) para *Nothofagus* spp. se reduce a solo cuatro variables significativas del árbol: DAP, edad, estado social y área basal de árboles de *Nothofagus* spp. de diámetros mayores al árbol competidor, y una sola variable significativa de rodal: el índice de densidad de rodal, lo cual implica la existencia de altas correlaciones entre ellas. Considerando como referencia para medir la bondad de predicción el coeficiente de correlación ($R^2=0,56$) del trabajo de Moreno *et al.* (2017) con el obtenido en el presente trabajo ($R^2=0,51$) puede considerarse satisfactoria la inclusión del percentil, más aún cuando logra subir la variación explicada desde 29 a 51%, al usar solo el DAP o el DAP más el percentil. La inclusión de variables difíciles y onerosas de medir como la edad del árbol y el área basal competidora y de variables subjetivas como el estatus social más el índice de densidad del rodal resultan en modelos de alto interés biológico pero de escasa eficiencia práctica o modelos no parsimoniosos.

Para considerar el uso del percentil como fuente de variación del crecimiento debe tenerse en cuenta el tamaño de la parcela, ya que en parcelas muy grandes se pierde el efecto de competencia entre individuos, que es el que se intenta

TABLA II
RESUMEN DE LOS MODELOS EVALUADOS,
UTILIZANDO 1/DAP Y PERCENTIL

Modelo	AIC	BIC	R ² -marg	R ² -cond	RMSE
1) Homocedástico	-422,02	-403,82	0,31	0,51	0,102
2) Heterocedástico. varIdent	-427,54	-398,40	0,25	0,42	0,103
3) Heterocedástico. varExp	-458,14	-436,28	0,53	0,89	0,106

AIC: Akaike Information Criterion, BIC: Bayesian Information Criterion, R²-marg: coeficiente de determinación sin considerar los efectos aleatorios, R² cond: coeficiente de determinación condicionados a los efectos aleatorios, RMSE: raíz error cuadrático medio.

TABLA III
ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y SU
SIGNIFICANCIA

Fuente	Estimación	EE	GL	t-value	p-value
(Intercept)	0,0880478	0,0475738	210	-1,850761	0,0656
1/DAP	2,0021812	0,4061569	210	4,929576	<0,0001
Percentil	0,0033458	0,0003588	210	9,325757	<0,0001

Fuente: variable ingresada al modelo, Estimación: estimación del parámetro, EE: error estándar del parámetro, GL: grados de libertad, t-value: valor t, p-value: significancia del parámetro.

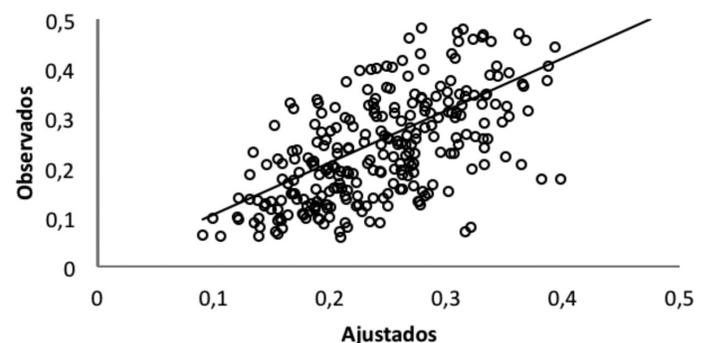


Figura 1. Gráfico de valores ajustados versus valores observados. Modelo 3.

capturar (García, 1992). En este trabajo se han usado parcelas de tamaño pequeño, por lo cual se puede considerar que existe una gran interacción entre árboles. Es muy probable que el efecto del percentil pierda significación a medida que aumente el tamaño de la parcela, un asunto que deberá ser estudiado.

Existen otros factores, como los climáticos, que en condiciones extremas pueden explicar gran parte de la variación del crecimiento, pero que no son usados debido a la imposibilidad de tenerlos bajo control. Corvalán *et al.* (2014b) dan cuenta del aumento del coeficiente de determinación entre el crecimiento anual corriente radial en DAP y el promedio de la precipitación anual en períodos de tiempo variables, desde el 1,3% al considerar la precipitación solo del último año hasta el 57,3% al considerar un período de 6 años, en árboles aislados de *N. obliqua*.

Conclusión

La inclusión del percentil de diámetro normal en que se encuentra el árbol en el rodal, mejora en forma significativa la predicción del crecimiento anual periódico en diámetro, cuando se usa adicionalmente al DAP del árbol, generando un modelo parsimonioso. El percentil de diámetro, de alguna forma refleja la competencia y simplifica eficientemente el modelo de predicción de crecimiento, al no requerir información adicional al DAP en las mediciones de parcelas tradicionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Investigación del Bosque Nativo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de Chile por el financiamiento de

esta investigación a través del proyecto 046/2013 "Diagramas de manejo de densidad para el control del tamaño de ramas en bosques septentrionales alto andinos dominados por Roble en la Región del Maule", así como a Paolo Cherubini por su valiosa ayuda en la discusión de la estabilidad social de los árboles.

REFERENCIAS

Adame P, Hynynen J, Canellas I, Del Río M (2008) Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. *Forest Ecol. Manag.* 255: 1011-1022.

Attis Beltran H, Martínez Pastur G, Ivancich HS, Lencinas MV, Chauchards LM (2013) Tree health influences diameter growth along site quality, crown class and age gradients in *Nothofagus* forests of southern Patagonia. *J. Forest Sci.* 59: 328-336.

Ceballos A (2015) *Combinación de Información Topográfica-Estructural Lidar y Teledetección Hiperespectral para Estimar la Diversidad Florística Vasculare de un Bosque Mediterráneo Caducifolio en la Precordillera Andina del Maule, Chile*. Tesis. Universidad de Chile. 83 pp.

Chauchard L, Sbrancia R (2003) Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*. *Bosque* 24(3): 3-16.

Cherubini P, Dobbertin M, Innes JL (1998) Potential sampling bias in long-term forest growth trends reconstructed from tree rings: A case study from the Italian Alps. *Forest Ecol. Manag.* 109: 103-118.

CONAF (1999) *Plan de Manejo Reserva Nacional Los Bellotos del Melado*. Documento de Trabajo N° 298. Unidad de Gestión Patrimonio Silvestre. Corporación Nacional Forestal. Chile. 71 pp.

Corvalán P, Galleguillos M, Hernández J (2014a) Presencia, abundancia y asociatividad de *Citronella mucronata* en bosques secundarios de *Nothofagus obliqua* en la precordillera de Curicó, región del Maule, Chile. *Bosque* 35: 269-278.

Corvalán P, Galleguillos M, Hernández J (2014b) Impacto de la declinación de la precipitación en el crecimiento diametral del roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) en el límite norte de su distribución. *Taller Internacional sobre Sequias*, Santiago-Chile.

Corvalán P (2015) *Diagrama de Manejo de la Densidad de Rodal para el Control del Tamaño de Ramas Basales en Bosques Septentrionales Altoandinos Dominados por Roble en la Región del Maule*. Serie Biomasa. Andros. Santiago, Chile 121 pp.

Donoso C (2007) Los bosques de Chile en el contexto mundial: importancia y valor. *Bosque Nativo* 41: 14-15.

Donoso C, Gallo LA, Donoso P, Azpilicueta MM (2004) Variación en *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (Roble, Coyán, Hualle o Pellín). En Donoso C, Premoli A, Gallo L, Ipinza R. (Ed) *Variación Intraespecífica en las Especies Arbóreas de los Bosques Templados de Chile y Argentina*. Ed. Universitaria, Santiago de Chile.

García O (1992) What is a diameter distribution. En *Proc. Symp. on Integrated Forest Management Information Systems*. Tsukuba, Japan (13-18/10/1991). pp. 11-29.

Husch B, Beers T, Kershaw J (2002) *Forest Mensuration*. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 456 pp.

Ivancich HS, Martínez Pastur GJ, Lencinas MV, Cellini, JM, Peri PL (2014) Proposals for *Nothofagus antarctica* diameter growth estimation: Simple vs. global models. *J. Forest Sci.* 60: 307-317.

Janse-Ten SH, Thomas EJ, Sterck FJ (2007) Explaining interspecific differences in sapling growth and shade tolerance in temperate forests. *J. Ecol.* 95: 1250-1260.

Larsen W, McCleary S (1972) the use of partial residual plots in regression analysis. *Technometrics* 14: 781-790.

Leemans R (1991) Canopy gaps and establishment patterns of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in two old-growth coniferous forests in central Sweden. *Plant Ecol.* 93: 157-165.

Lusk CH (2004) Leaf area and growth of juvenile temperate

evergreens in low light: species of contrasting shade tolerance change rank during ontogeny. *Funct. Ecol.* 18: 820-828.

Medhurst JL, Beadle CL, Neilsen WA (2001) Early-age and later-age thinning affects growth, dominance, and intraspecific competition in *Eucalyptus nitens* plantations. *Can. J. Forest Res.* 31: 187-197.

Monserud RA, Sterba H (1996) A basal area increment model for individual trees growing in even-and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecol. Manag.* 80: 57-80.

Morales R, Weintraub A, Peters R, García J (1979) *Modelos de Simulación y Manejo para Plantaciones Forestales*. Documento de Trabajo N° 30. DP/CHI/76/003. Chile. 114 pp.

Moreno PC, Palmas S, Escobedo FJ, Cropper WP, Gezan SA (2017) Individual-tree diameter growth models for mixed *Nothofagus* second growth forests in Southern Chile. *Forests* 8: 506.

Nakagawa S, Shielzeth H (2013) A general and simple method for obtain R2 from generalized mixed effect model. *Meth. Ecol. Evolut.* 4: 133-142.

Palik BJ, Pregitzer KS (1993) The vertical development of early successional forests in Northern Michigan, USA. *J. Ecol.* 81: 271-285.

Pinheiro J, Bates D (2000) *Mixed-Effects Model in S and S-Plus*. Springer. Nueva York, EEUU. 537 pp.

R Core Team (2016) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>

Salas C, Gregoire TG, Craven DJ, Gilabert H (2016) Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. *Bosque* 37: 03-12.

Sutton WRJ (1973) Changes in tree dominance and form in a young radiata pine stand. *New Zeal. J. Forest. Sci.* 3: 323-330.

Zasada M, Cieszewski CJ (2005) A finite mixture distribution approach for characterizing tree diameter distributions by natural social class in pure even-aged Scots pine stands in Poland. *Forest Ecol. Manag.* 204: 145-158.