



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

CRECIMIENTO Y CAPTURA DE CARBONO EN UN BOSQUE RALEADO DE
***Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst. EN LA REGIÓN DE MAGALLANES Y LA**
ANTÁRTICA CHILENA, CHILE

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANA LUISA ARAOS CARVACHO

Profesor Guía:
Gustavo Cruz M. Dr. Ing. Forestal

Santiago, Chile
2019

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

CRECIMIENTO Y CAPTURA DE CARBONO EN UN BOSQUE RALEADO DE
***Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst. EN LA REGIÓN DE MAGALLANES Y LA**
ANTÁRTICA CHILENA, CHILE

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANA LUISA ARAOS CARVACHO

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía: Dr. Gustavo Cruz M.	...6,5...
Prof. Consejero: Dr. Juan Caldentey P.	...6,5...
Prof. Consejero: Dr. Álvaro Promis B.	...5,8...

DEDICATORIA

Dedicada a todos quienes necesiten saber que las cosas no siempre funcionan como uno quiere, o en el momento que uno desea, pero las cosas se pueden lograr. Cada paso, por pequeño, es un paso más cerca. Que las acciones y omisiones tienen consecuencias en el tiempo, pero no por eso nos tenemos que quedar con eso. Las cosas se arreglan y los capítulos se cierran cuando existe la voluntad.

Finalmente, dedicada a mi compañero de vida, Felipe Wolff, presente en cada uno de mis altibajos en este y mil otros asuntos. Y, en la espera, que sigamos así hasta que no hayan más desafíos que vivir.

«Cuando se es muy joven y se sabe poco, las montañas son montañas, el agua es agua y los árboles son árboles. Cuando se ha estudiado y se es leído, las montañas ya no son montañas, el agua ya no es agua y los árboles ya no son árboles. Cuando se es sabio, nuevamente las montañas son montañas, el agua es agua y los árboles son árboles.»
- Antiguo Refrán del Budismo Zen.

AGRADECIMIENTOS

A la paciencia de mi querido profesor guía, Gustavo Cruz, quien fue no sólo un pilar académico, sino un apoyo incondicional en lo personal.

A Claudia Cerda, por su apoyo y por ser mujer admirable, fuerte e inteligente, que inspira a querer mejorar.

A Rafael Contreras en su hospitalidad en la Provincia de Última Esperanza.

A mi marido, Felipe Wolff, quien me apoyó incondicionalmente en forma amorosa y paciente.

Al apoyo y amor de mi madre, mis hermanos y toda mi familia. Incluso la que mira desde el firmamento.

A mis amigos, que entre risas, regaños, y ejemplo, me instaron a seguir adelante.

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes de coihue de Magallanes	2
1.1.1	Antecedentes generales de la especie.....	2
1.1.2	Antecedentes generales de los bosques de Coihue de Magallanes	2
1.1.3	Antecedentes de crecimiento de la especie	3
1.1.4	Silvicultura aplicable a los renovales de Coihue de Magallanes	3
1.1.5	Efectos de raleo en los bosques de Coihue de Magallanes	4
1.1.6	Antecedentes de biomasa en los bosques de Coihue de Magallanes	4
1.2	Antecedentes de captura de carbono	5
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Objetivo General	6
1.3.2	Objetivos Específicos.....	6
3	Materiales y Métodos	7
3.1	Materiales	7
3.1.1	Área de Estudio	7
3.1.2	Clima.....	8
3.1.3	Relieve.....	8
3.1.4	Suelos	8
3.1.5	Vegetación.....	8
3.2	Método.....	8
3.2.1	Cuantificación del crecimiento en diámetro, volumen y biomasa aérea, según tipos de raleo.	8
3.2.2	Estimación de la captura de carbono aéreo y el efecto de los raleos	11
4	Resultados	12
4.1	Crecimiento a nivel individual	12
4.1.1	Incremento Diamétrico.....	12
4.1.2	Incremento en Área Basal, Volumen y Biomasa	12
4.2	Crecimiento a nivel de rodal.....	14
4.2.1	Área basal y Diámetro cuadrático medio	14
4.2.2	Incremento Volumen y Biomasa aérea	15
4.3	Captura de carbono aéreo y el efecto de los raleos	16

5	Discusión.....	17
5.1	Crecimiento a nivel individual	17
5.1.1	Incremento Diamétrico.....	17
5.1.2	Crecimiento Anual Corriente (CAC) y Crecimiento Anual Medio (CAM)	17
5.1.3	Incremento en Área Basal, Volumen y Biomasa	19
5.2	Crecimiento a nivel de rodal.....	19
5.2.1	Área Basal	20
5.2.2	Crecimiento Anual Corriente (CAC) y Crecimiento Anual Medio (CAM)	20
5.2.3	Incremento Volumen y Biomasa aérea	21
5.3	Mortalidad	21
5.4	Captura y Equivalencia de Carbono	23
5.4.1	Captura aérea de Carbono	23
5.4.2	Equivalencia de Carbono Capturado.....	24
6	Conclusiones	25
7	Bibliografía	26
8	Apéndices	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Biomasa acumulada total y por componente (t/ha) de bosques de Coihue de Magallanes en el sector de San Juan.	4
Cuadro 2. Biomasa acumulada total y por componente (t/ha) de bosques de Coihue de Magallanes en la Provincia de Última Esperanza.	5
Cuadro 3. Contenido de carbono por componente aéreo (t/ha) en bosques de Coihue de Magallanes en la Provincia de Última Esperanza.	5
Cuadro 4. Factor de contenido de carbono utilizando en los distintos componentes aéreos.	11
Cuadro 5. Crecimiento anual medio en diámetro antes (1999-2005) y después (2005-2012) de los diferentes tratamientos aplicados al rodal. Letras distintas indican crecimientos significativamente diferentes ($p < 0,05$).	12
Cuadro 6. Existencias en, área basal, volumen y biomasa a nivel individual para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	13
Cuadro 7. Cambio en las existencias de área basal, volumen y biomasa a nivel individual entre los años 2005 y 2012.	13
Cuadro 8. Existencias en número de árboles, área basal y diámetro cuadrático medio de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	14
Cuadro 9. Existencias en número de árboles, volumen y biomasa de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	15
Cuadro 10. Contenido total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	16
Cuadro 11. Tablas de rodal y existencias en área basal del raleo por lo bajo para el año 2012.	31
Cuadro 12. Existencias en biomasa por componente del raleo por lo bajo para el año 2012.	31
Cuadro 13. Tablas de rodal y existencias en área basal del raleo selectivo para el año 2012.	32
Cuadro 14. Existencias en biomasa por componente del raleo selectivo para el año 2012.	32
Cuadro 15. Tablas de rodal y existencias en área basal del testigo para el año 2012.	33
Cuadro 16. Existencias en biomasa por componente del testigo para el año 2012.	33
Cuadro 17. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el tratamiento de raleo por lo bajo, para los años 2005 y 2012.	34

Cuadro 18. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el tratamiento de raleo selectivo, para los años 2005 y 2012.....	34
Cuadro 19. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el rodal testigo, para los años 2005 y 2012.....	35
Cuadro 20. Existencias potenciales en área basal, volumen y biomasa de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	36
Cuadro 21. Incremento potencial en área basal, volumen y biomasa de los rodales entre los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	36
Cuadro 22. Contenido mínimo total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	37
Cuadro 23. Contenido potencial total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.	38
Cuadro 24. Equivalencia mínima de carbono emitido por diferentes combustibles. Fuente: Elaboración Propia con datos de IAP, 2011.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación espacial del ensayo. Península Antonio Varas, Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.....	7
Figura 2. Comportamiento del CAC y CAM para dos árboles de <i>N. betuloides</i> representativos de la población testigo. Para los tarugos T30 y T33 se cuentan 70 y 37 años, respectivamente. En ambos casos se verifica una tendencia a la disminución del CAC por debajo del CAM alrededor de los 20 años.....	18
Figura 3. Comportamiento del CAC y CAM para los distintos raleos aplicados.	21
Figura 4. Imagen general de caída de árboles en el sitio de estudio.	22
Figura 5. Emisión de carbono histórica per cápita y a nivel país en Chile. Elaboración propia con datos de Banco Mundial (2016).	24

RESUMEN

En el marco de un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, entre ellos el dióxido de carbono (CO₂) a nivel de Chile y el mundo, y del alza constante de las emisiones *per capita* pese a los esfuerzos de investigación y mitigación, es que se genera la necesidad de abordar las opciones de mitigación y captura desde otras aristas, entre esas, el incremento de captura por parte del manejo de masas boscosas.

En virtud de lo anterior, el presente trabajo estudió un renoval de *Nothofagus betuloides* (coihue de Magallanes) en la Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y la Antártica chilena, utilizando tratamientos silvícolas de raleo por lo bajo y raleo selectivo, en contraste con un rodal testigo. La finalidad fue descubrir cómo los parámetros de intensidad y aplicación de los raleos afectan el crecimiento diametral, volumétrico, de biomasa aérea y en la captura de carbono atmosférico después de siete años.

La respuesta individual de los árboles remanentes fue mayor en tanto más alta la intensidad de raleo realizado. No obstante, a nivel de rodal, ninguno de los tratamientos obtuvo una mejora respecto de las tasas de crecimiento anterior, por lo que se considera que los tratamientos aplicados no aumentaron el crecimiento respecto a un período previo, sino, más bien, fueron un aporte en la mitigación de la pérdida de crecimiento por caída en masa de los árboles, atribuible con mayor probabilidad a las condiciones climáticas. El rodal con raleo por lo bajo, con una extracción inicial de 36,78% del área basal, registró el mayor incremento diametral promedio con 3,01 mm/año, seguido del raleo selectivo con 2,29 mm/año, y finalmente el testigo con un incremento de 1,90 mm/año. El tratamiento de raleo por lo bajo fue también el que obtuvo cifras más altas en sus tasas de crecimiento a nivel de rodal, calculándose incrementos de 1,1 m²/ha/año en área basal, 10,7 m³/ha/año en volumen, 8,2 t/ha/año en biomasa aérea, y 3,1 t/ha/año de captura de carbono atmosférico.

De acuerdo con el presente estudio, se calcula que las emisiones de carbono anuales de una persona en Chile podrían ser capturadas por 1,5 ha de bosque secundario de *N. betuloides*, o bien que 10 ha de bosque secundario podrían cubrir las emisiones de 6 personas. Considerando las condiciones actuales relacionadas a la emisión de CO₂ y gases de efecto invernadero, parece menester considerar distintas opciones que permitan mitigar esta situación, emplazando a los tratamientos silviculturales como una herramienta útil para el aumento en el secuestro de carbono atmosférico.

Palabras claves: *Nothofagus betuloides*, raleo, tratamientos silviculturales, crecimiento, biomasa, captura de carbono.

ABSTRACT

In the context of an increase in greenhouse gases emissions, atmospheric carbon dioxide (CO₂) among them, both in Chile and the world, and the constant *per capita* emissions rise despite the research and mitigation efforts, became a need to address the mitigation and capture issues from different perspective, for example, increase the CO₂ capture by forest management.

Under the above, the present document studied a young forest of *Nothofagus betuloides* (coihue de Magallanes) in Última Esperanza province, Magallanes y la Antártica Chilena region, with silvicultural treatments of lower and selective thinning, in contrast with an untreated stand, in order to determine how thinning, specifically intensity and objective tree extracted may affects the diametric growth, volume increase, and carbon sequestration.

The effect of a silvicultural intervention in this kind of forest result to be directly proportional to the thinning intensity, besides being statistically significant. However, neither of treated stands, even untreated stand, got an increase over its previous growth rates. Because of that, it is considered than the treatments did not accomplished the goal of increasing the growing rates, but they prevent the decrease on the growth rates that could be caused by weather conditions. The lower thinned stand, with initial extraction of 36.78% from basal area, registered the higher values of diametric growth with 3.01 mm/yr, followed by selective thinned stand with 2.29 mm/yr, and finally the untreated stand with 1.90 mm/yr. The lower thinned stand also obtained higher values on growing rates at stand level, with 1.1 m²/ha/yr in basal area, 10.7 m³/ha/yr in tree volume, 8.2 t/ha/yr in aerial biomass and 3.1 t/ha/yr in carbon sequestration.

According to this study, it is estimated that one chilean person's annual carbon emission can be captured by 1.2 ha of *N. betuloides* second growth forest. Considering the actual conditions related to CO₂ emission, seems necessary to consider different choices to allow us to mitigate this situation. Silvicultural treatments may be a useful tool to increase the carbon sequestration by the forests.

Key words: *Nothofagus betuloides*, thinning, silvicultural treatments, growth rates, biomass, carbon sequestration.

1 INTRODUCCIÓN

La captura de carbono ha cobrado un importante rol a nivel mundial debido a la creciente tasa de emisiones de CO₂ por parte de la industria y las ciudades. Dicha situación ha generado que no sólo se considere como un beneficio inherente, sino que sea necesario conocer el balance de carbono entre captura de los bosques y emisiones, con el fin de aminorar los daños producidos al medioambiente. En este marco, nació un mercado en torno a la capacidad de captura de carbono de los bosques, sin embargo, hasta ahora el mercado se mantiene inestable y los valores asignados por tonelada de carbono secuestrada distan considerablemente entre las diferentes naciones (Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, 2013; Department of Energy y Climate Change, 2015)

Debido a esto, la valoración de la captura de carbono de los bosques, en la mayoría de los casos, se realiza a partir de conversiones y equivalencias de material sobre otros tipos de emisiones, como, por ejemplo, calcular la equivalencia de producción anual de leña con respecto a la misma energía que genera cierta cantidad de combustible fósil quemado, y, a su vez, encontrar la diferencia en las emisiones por cada tipo de combustible cuando su valor energético es el mismo.

Considerando las extensiones que alcanza el bosque nativo en Chile, este presenta una alta potencialidad en relación a la captura de carbono, con objeto de contribuir a mitigar el cambio climático y a la mantener la continuidad en la provisión de servicios de regulación ambiental. Sin embargo, para estos fines es necesario conocer las tasas de crecimiento y el efecto de los tratamientos silviculturales en los bosques, con el objetivo de maximizar el potencial de captura y evitar su degradación.

Los estudios realizados en bosques australes de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides* (Mirb) Oerst) se centran en la capacidad de hibridación con otras especies del género *Nothofagus*, en especial con *N. dombeyi* (Mirb) Oerst y *N. alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst (Donoso y Atienza, 1984; Stecconi *et al.*, 2004; Quiroga *et al.*, 2005), en los suelos donde se desarrolla la especie (Gerding y Thiers, 2002; Romanyà *et al.*, 2005) y en aspectos de la fitosociología de las comunidades que conforma (Eskuche, 1968; Ramirez y Figueroa, 1985). Los aspectos del crecimiento de la especie han sido poco abordados, existiendo pocos estudios al respecto (Young, 1972; Vukasovic *et al.*, 2001; Cruz y Caldentey, 2007; Márquez, 2011) Por otro lado, la captura de carbono ha sido abordada sólo en los últimos años, existiendo menos información, en relación a la disponible para otras especies nativas congéneres, especialmente con árboles más comerciales de similar distribución, como lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) (Premoli y Brewer, 2007; Valdés, 2012).

En virtud de lo anterior, este proyecto de memoria de título pretende analizar el crecimiento y la captura de carbono en un bosque manejado de coihue de Magallanes en la Península Antonio Varas, en la Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y la Antártica Chilena, Chile.

1.1 ANTECEDENTES DE COIHUE DE MAGALLANES

1.1.1 Antecedentes generales de la especie

El coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides* (Mirb), Oerst) es un árbol siempreverde y endémico de los bosques subantárticos de Chile y Argentina. Perteneció a la familia *Nothofagaceae*, distribuyéndose desde Valdivia (Región de los Ríos) hasta el Cabo de Hornos (Región de Magallanes y la Antártica Chilena), siendo en el extremo austral el árbol más frecuente del bosque nativo, ocupando especialmente las costas occidentales y gran parte de las islas de este sector (Dollenz, 1980; Donoso, 1981; Rodríguez *et al.*, 1983; Pisano 1994). Es una especie monoica de hasta 30 m de altura y que puede alcanzar incluso los 2 m de DAP en Magallanes y Tierra del Fuego (Rodríguez *et al.*, 1983).

Se desarrolla principalmente en las condiciones propias del clima oceánico frío húmedo y debido a su extensa distribución geográfica se desarrolla en diferentes tipos de suelo, destacándose los constituidos esencialmente por material orgánico semi-descompuesto, suelos delgados turbosos (con 20 cm de profundidad), pero no pantanosos y con un horizonte podzólico (Díaz *et al.*, 1960; Di Castri y Hajek., 1976; Dollenz, 1995; Thiers, 1997).

En la zona septentrional de su distribución se encuentra formando bosques puros o asociados a *Pilgerodendron uviferum* (D. Don.) Florin., *Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oerst y *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, y más a sur se mezcla además, con *Weinmannia trichosperma* Cav, *Drimys winteri* J. R. et Forster, *Tepualia stipularis* (H. et A.) Griseb y *Podocarpus nubigena* Lindl. (Rodríguez *et al.*, 1983).

1.1.2 Antecedentes generales de los bosques de coihue de Magallanes

Coihue de Magallanes, como Tipo Forestal, se presenta desde los 47° hasta los 55°30' S en las islas, archipiélagos y áreas costeras de la Región de Magallanes y la Antártica Chilena (GTZ- CONAF, 1998). Abarca una superficie de 1.999.353,9 ha correspondiente al 13,9% de la superficie nacional cubierta con bosque nativo (CONAF, 2017). De un total de 2.671.594 ha de bosque nativo presente en la Región de Magallanes, este Tipo Forestal ocupa 929.346 ha, de las cuales un 66% se encuentra dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) (CONAF, 2017). De la superficie total del bosque de la especie estudiada presentes en la Región de Magallanes, el 63% se encuentran en la Provincia de Última Esperanza (583.740 ha). Dentro de la Provincia, 581.800 ha (92%) corresponden a bosque puro y 49.600 ha (8%) a bosque mixto. En relación al bosque puro, sus funciones más relevantes son como bosques de preservación y de protección, con 404.800 ha (70%) y 103.400 ha (18%), respectivamente. El resto de la superficie corresponde a bosque de producción con 66.200 ha (11%) y sólo 7.400 ha (1%) a bosques de producción con restricciones (Ibarra *et al.*, 2007). En relación con la superficie total de bosque secundario existente en la Región de Magallanes (199.978 ha), considerando la estructura de renoval y

adulto-renoval, un 53,8% (105.670 ha) cumplen las funciones de bosque de protección y preservación del SNASPE (CONAF, 2017).

1.1.3 Antecedentes de crecimiento de la especie

En la zona austral, Young (1972) determinó un incremento diametral de entre 0,73 y 1,90 mm para coihue de Magallanes en los sectores insulares, incrementando hasta 2,7 mm en zonas méxicas, alcanzando la media aritmética 1,76 mm.

Pisano (1978), calculó un incremento promedio de 1,2 mm anuales para árboles en un área en proceso de desglaciación. Con esta información fijó una edad de 21 años para árboles de 2,5 cm de DAP, establecidos en los años 1956, y 323 años para árboles de 41,2 cm de DAP originados en el año 1634. Los diámetros máximos encontrados en esta situación fueron de 55,0 cm, lo que correspondería a una edad estimada de 458 años. Schmidt y Caldentey (1994), para un renoval de 40 años con una altura dominante de 8 m, ubicado en la Estancia Canelo (Región de Magallanes y la Antártica Chilena), establecieron incrementos medios anuales periódicos en diámetro y altura de 1,5 mm/año y 16,9 cm/año, respectivamente.

En renovales de *N. betuloides* ubicados en el sector de San Juan, dentro de la Región de Magallanes, Silva (1997) estimó un incremento medio anual del DAP en 1,2 mm/año; 17,9 cm/ en altura y un incremento en volumen de 0,004 m³/año, para individuos de 65 años. Estos valores aumentaron para una edad de 75 años, determinando un incremento en DAP de 1,7 mm/año; 18,3 cm/año en altura y 0,007 m³/árbol/año en volumen.

Márquez (2011), para individuos de renovales ubicados en la Provincia de Última Esperanza, determinó un promedio de incremento anual medio (CAM) de 1,85 mm/año en diámetro, de 0,27 m/año en altura y de 0,0036 m³/año en volumen por árbol. Además, a nivel de rodal obtuvo un incremento promedio de 0,68 m²/ha/año en área basal y 7,3 m³/ha/año en volumen.

1.1.4 Silvicultura aplicable a los renovales de coihue de Magallanes

De acuerdo con el Reglamento N° 259 del Decreto Ley 701, para el Tipo Forestal Coihue de Magallanes se pueden aplicar los métodos de corta de protección y corta selectiva. Estas son cortas de cosecha y regeneración que se aplican a bosques adultos, con el objeto de promover la regeneración. Por el contrario, los renovales de coihue de Magallanes generalmente corresponden a bosques secundarios coetáneos, jóvenes en etapa de latizal a fustal joven originados después de la quema de los bosques primarios de la misma especie. En este caso el tratamiento silvicultural aplicable a estos bosques es el raleo, que es una corta intermedia, la cual consiste en la eliminación de algunos individuos con el fin de favorecer el desarrollo de una población previamente seleccionada (Schmidt y Cruz, 2007). Se reconocen tres tipos generales de raleo, a saber: raleo por lo bajo (ascendente), raleo por lo alto (descendente) y raleo selectivo (Vita, 1996; Gardiner y Quine, 2000).

El raleo por lo bajo consiste en la selección y eliminación de una cierta cantidad o porcentaje de árboles existentes, eliminando progresivamente desde los árboles de menor clase diamétrica o suprimidos, hacia los árboles de mayor clase diamétrica. El objetivo es eliminar el consumo de recursos por parte de los árboles suprimidos a intermedios, concentrando el crecimiento en los árboles dominantes de mayor DAP (Schmidt *et* Caldentey, 1994). El raleo selectivo es considerado un raleo por lo alto y consiste en la selección de a lo menos 100 a 200 árboles futuros por hectárea, vitales, de buena forma y sanidad, en lo posible que se encuentren distribuidos homogéneamente. En torno a cada árbol seleccionado se cortan entre 2 a 4 árboles competidores de manera de favorecer su desarrollo. Se consideran competidores directos sólo aquellos individuos dominantes que presenten sus copas por sobre o al mismo nivel que la de los árboles seleccionados (Schmidt y Cruz, 2007).

1.1.5 Efectos de raleo en los bosques de Coihue de Magallanes

Martínez-Pastur *et al.* (2002) aplicaron, en un bosque joven de *N. betuloides* de Tierra del Fuego, raleos de tipo selectivo en tres niveles de intensidad, y los compararon con un rodal no intervenido a lo largo de 6 años. El rodal no intervenido tenía un incremento de 0,1 y 0,2 cm de DAP al año, un aumento volumétrico de 6,3 m³/ha/año y un autorraleo de 350 árb/año. El raleo de alta intensidad provocó un incremento de 0,52 cm de DAP al año, el cual fue disminuyendo en proporción cuando la intensidad de raleo decreció (0,37 y 0,31 cm/año para los raleos de intensidad media y baja respectivamente). El rodal con raleo menos intenso mostró el crecimiento en volumen más alto (13,6 m³/ha/año) comparado con los 9,5 m³/ha/año del raleo más fuerte.

Según Schmidt y Cruz (2007), el crecimiento en diámetro bajo condiciones de manejo puede al menos duplicarse, alcanzando 5 a 6 mm/año, en comparación con los 2,8 mm/año de crecimiento diamétrico obtenidos en condiciones sin manejo.

1.1.6 Antecedentes de biomasa en los bosques de Coihue de Magallanes

Silva (1997), estimó valores de biomasa aérea para renovales de coihue de Magallanes que fluctúan entre las 217 y 302 t/ha, dependiendo de la densidad del rodal, con una distribución cercana al 87% en la zona del fuste y 13% en biomasa de la copa (Cuadro 1).

Cuadro 1. Biomasa acumulada total y por componente (t/ha) de bosques de Coihue de Magallanes en el sector de San Juan.

Rodal	Densidad (árb/ha)	Biomasa t/ha						Total
		Fustal			Copa			
		Madera	Corteza	Total	Ramas	Hojas	Total	
Río San Juan	4.100	168,7	22,2	190,9	19,7	5,9	25,6	216,5
Río San Juan	1.880	229,0	27,3	256,3	38,6	6,4	45,0	301,3

Fuente: Adaptado de Silva (1997).

Márquez (2011), determinó valores de biomasa entre 250 y 260 t/ha, distribuidas entre una participación promedio de biomasa fustal y de copa del 82% y del 18%, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Biomasa acumulada total y por componente (t/ha) de bosques de Coihue de Magallanes en la Provincia de Última Esperanza.

Rodal	Densidad (árboles/ha)	Biomasa t/ha						Total
		Fustal			Copa			
		Madera	Corteza	Total	Ramas	Hojas	Total	
A	1.928	200,7	24,1	224,8	38,7	5,7	44,4	269,2
B	1.824	192,8	23,2	216,0	44,7	5,5	50,2	266,2

Fuente: Adaptado de Márquez (2011).

1.2 ANTECEDENTES DE CAPTURA DE CARBONO

Márquez (2011), encontró que el contenido de carbono promedio para un renoval de coihue de Magallanes no intervenido es de 121 t/ha, con 86,6% de la captura acumulada en el fuste y 13,4% en la copa (Cuadro 3).

Cuadro 3. Contenido de carbono por componente aéreo (t/ha) en bosques de Coihue de Magallanes en la Provincia de Última Esperanza.

Rodal	Densidad (árboles/ha)	Captura de Carbono t/ha						Total
		Fuste			Copa			
		Madera	Corteza	Total	Ramas	Hojas	Total	
A	1.928	95,3	11,4	107,0	18,4	2,7	28,7	123,5
B	1.824	91,6	11,0	102,8	21,2	2,6	30,1	118,7
Promedio		93,5	11,2	104,9	19,8	2,7	29,4	121,1

Fuente: Márquez (2011).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar el crecimiento en diámetro, el volumen, la biomasa aérea y la captura de carbono en un bosque raleado de *Nothofagus betuloides*, en la Península Antonio Varas, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar y comparar crecimiento en diámetro, volumen y biomasa aérea, según dos tipos de raleo.
- Estimar la captura aérea de carbono del rodal y el efecto de los diferentes tipos de raleo sobre ésta.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Área de Estudio

El área de estudio abarca 3,9 ha, ubicadas en el kilómetro 14,8 del camino Puerto Natales a Bahía Talcahuano, en la península Antonio Varas, Provincia Última Esperanza, Región de Magallanes y Antártica Chilena, en las coordenadas UTM 4.256.900 N y 663.030 E; 4.258.390 N y 655.198 E, a 50 msnm (Figura 1).

El rodal estudiado corresponde a un bosque secundario coetáneo de *N. betuloides*, originado a partir de incendios en el bosque primario. El bosque fue sometido a tratamientos de raleo por lo bajo y raleo selectivo en el año 2005. La densidad inicial del bosque oscilaba entre 1.700 y 1.900 árb/ha, con área basal media de 60,2 m²/ha. La intensidad de extracción fue de 36,8% sobre el área basal para el raleo por lo bajo, y de 11,5% sobre el área basal para el raleo selectivo, la densidad de los rodales remanente fue de 804 y 1.339 árb/ha respectivamente.

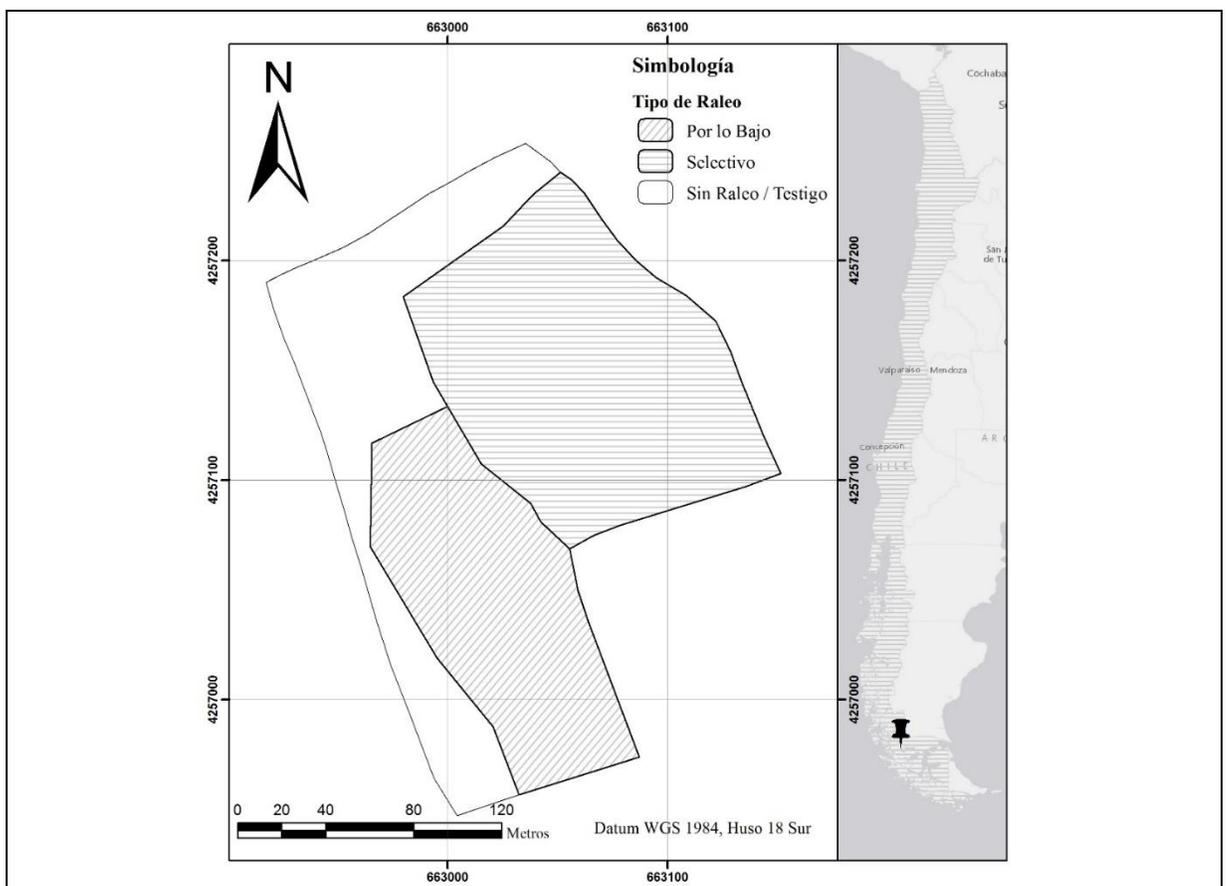


Figura 1. Ubicación espacial del ensayo. Península Antonio Varas, Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Chile.

3.1.2 Clima

Corresponde a un clima de tipo mediterráneo frío con lluvia invernal, con temperaturas medias anuales del aire de 2,6°C y precipitaciones uniformes durante el año registradas en un promedio de 493 mm, en forma de nieve en época invernal. La zona está expuesta a vientos recurrentes de hasta 120 km/h durante todo el año (INIA, 1989; IDE 2016; UChile-Agrimed 2017).

3.1.3 Relieve

El sector se ubica entre la Cordillera de Los Andes y las Planicies Orientales, en la Región Sub-Andina Oriental, con territorios mesetiformes de baja altura, atravesados por cordones montañosos generalmente menores a 1.000 msnm (Pisano, 1977).

3.1.4 Suelos

Los suelos son parte del grupo Pardo-Podzólicos, de origen glaciar-volcánico. Su textura es liviana, de profundidad media, sin problemas de drenaje, y fertilidad moderada a baja (Díaz *et al.*, 1960).

3.1.5 Vegetación

El área, según Gajardo (1994), es parte de la Región de los Bosques Siempreverdes y de las Turberas, subRegión del Bosque Siempreverde Micrófilo. Localmente, corresponde a un bosque secundario coetáneo, de alrededor de 100 años, generado a causa de la quema de los bosques primarios del sector.

3.2 MÉTODO

El método está basado en la comparación de datos obtenidos en parcelas realizadas en los mismos rodales en los años 2005 posterior al raleo y 2012.

3.2.1 Cuantificación del crecimiento en diámetro, volumen y biomasa aérea, según tipos de raleo.

Generación de Tablas de Rodal

Para generar las tablas de rodal y extrapolar los datos a nivel de hectárea, se realizaron tres parcelas circulares de 8 m de radio en cada uno de los tratamientos. En cada parcela se contaron los árboles presentes, registrando su DAP y altura. La extrapolación de los datos se generó mediante la multiplicación por el factor de expansión, el cual fue calculado con la siguiente fórmula.

$$F = 10.000 / (\pi * r^2)$$

En donde,

F es el factor de expansión,

R es el radio de la parcela en metros.

La mortalidad entre los años 2005 y 2012 se determinó a partir de la diferencia entre las tablas del rodal residual del año 2005 (Márquez, 2011) y las parcelas de inventario del año 2012 para cada tipo de raleo y el testigo.

Cuantificación del Crecimiento en Diámetro

Para estimar el crecimiento en diámetro de los árboles se utilizaron 50 tarugos de incremento extraídos de cada uno de los tratamientos (Raleo por lo Bajo, Raleo Selectivo y testigo). Los tarugos se extrajeron en forma representativa para cada una de las distintas clases diamétricas presentes en los rodales. El procedimiento fue realizado con un taladro de incremento, a una altura de 1,3 m en el fuste. Los tarugos fueron fijados en molduras, y posteriormente lijados y pulidos para facilitar la visualización y medición de los anillos de crecimiento. Los anillos fueron contabilizados y medidos utilizando un cronodendrógrafo LINTAB con precisión 1/100 de milímetro, y software de análisis TSAP-Win™ 4.69b.

La cuantificación y comparación del crecimiento en diámetro se realizaron por medio de la medición del ancho de los anillos antes y después del raleo realizado en el año 2005. Para determinar si existen diferencias entre los 7 años previos y posteriores al raleo, se efectuó una prueba t para observaciones pareadas (Canavos, 1988), considerando $p = 0,95$.

Crecimiento anual corriente (CAC) y crecimiento anual medio (CAM)

El crecimiento anual corriente corresponde al crecimiento bruto entre un año y el siguiente, y fue estimado como la diferencia de medida entre un anillo y el anillo inmediatamente posterior, tal como se indica en la siguiente fórmula:

$$CAC_t = L_t - L_{t-1}$$

En donde,

CAC_t es el crecimiento anual corriente asociado al año t,

L_t es el largo del tarugo en mm hasta el anillo t,

L_{t-1} es el largo del tarugo en mm hasta el anillo t-1.

El crecimiento anual medio corresponde al crecimiento promedio en un número de años dado, éste se calculó como la totalidad de medida hasta un anillo, dividido en el número de anillos totales previos, como se muestra en la fórmula:

$$CAM_t = \frac{L_t}{t}$$

En donde,

CAM_t es el crecimiento anual medio asociado al año t,

L_t es el largo del tarugo en mm hasta el anillo t,

t es el número asociado a la cuenta del anillo.

Estimación del Crecimiento Volumétrico y Biomasa Aérea

Para estimar el crecimiento en volumen a nivel individual se utilizó una función alométrica local de volumen (Península Antonio Varas), calculada por Márquez (2011).

Función alométrica P. Antonio Varas:

$$V = 0,000388643 \times (DAP^{1,28365}) \times (H^{0,929743})$$

En donde,

V es el volumen en m^3 ,

DAP es el Diámetro en centímetros medido a 1,3 m de altura,

H es la Altura del árbol en m.

El crecimiento en biomasa aérea se estimó a través de las funciones de biomasa para renovales de coihue de Magallanes desarrolladas por Silva (1997), en donde el DAP es expresado en cm:

Peso seco total del árbol (Kg). $\ln PSA = -2,2257 + 2,39 * \ln (DAP)$

Peso seco madera (Kg). $\ln PSM = -2,45 + 2,38 * \ln (DAP)$

Peso seco corteza (Kg). $\text{Ln PSC} = -3,88 + 2,16 * \text{Ln (DAP)}$

Peso seco total fuste (Kg). $\text{Ln PSTF} = -2,24 + 2,35 * \text{Ln (DAP)}$

Peso seco de ramas (madera y corteza) (Kg). $\text{Ln PSRA} = 0,0327 * \text{Ln (DAP)}^{3,96}$

Peso seco hojas (Kg). $\text{Ln PSHO} = -4,42 + 1,87 * \text{Ln (DAP)}$

Peso seco total copa (Kg). $\text{Ln PSTC} = 0,1002 * \text{Ln (DAP)}^{3,05}$

Para estimar el crecimiento en volumen y biomasa a nivel de rodal para cada tipo de raleo y testigo (Márquez, 2011) se compararon las existencias volumétricas y en biomasa aérea de los rodales entre los años 2005 y 2012.

3.2.2 Estimación de la captura de carbono aéreo y el efecto de los raleos

El contenido de carbono se estimó a través de la multiplicación entre el factor de contenido de carbono y la biomasa de cada uno de los componentes (fuste, hojas y ramas) obtenido para individuos provenientes del área de estudio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factor de contenido de carbono utilizando en los distintos componentes aéreos.

Factor del Contenido de Carbono (%)						
Fuste			Copa		Árbol	
Madera	Corteza	Total	Ramas (Madera y corteza)		Hojas	Total
47,5	47,5	47,5	47,5		48,1	47,7

Fuente: Márquez, 2011.

Para determinar la captura total de carbono se utilizaron los coeficientes de conversión de biomasa fustal a biomasa por componente y total desarrollado por Márquez (2011).

El efecto de los distintos tipos de raleos sobre el secuestro de carbono se visualizó mediante un análisis gráfico y mediante la comparación de diferencias por análisis de varianza y prueba de t pareada, previa verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los valores (Canavos, 1988).

4 RESULTADOS

Los resultados aquí obtenidos se basan en las diferencias encontradas entre las mediciones realizadas entre 2005 y 2012, entre los rodales con tratamiento de raleo por lo bajo, selectivo y testigo.

4.1 CRECIMIENTO A NIVEL INDIVIDUAL

4.1.1 Incremento Diamétrico

Los resultados obtenidos a nivel individual muestran que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) antes y después de los tratamientos realizados.

Entre los tratamientos se observa que el raleo por lo bajo presenta el mayor crecimiento diamétrico a nivel individual, seguido del raleo selectivo, y finalmente el testigo. Existen diferencias significativas entre un raleo por lo bajo y un raleo selectivo ($t = 5,87$) y a su vez, la aplicación de tratamiento es significativamente diferente de la condición testigo ($t = -4,9$) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Crecimiento anual medio en diámetro antes (1999-2005) y después (2005-2012) de los diferentes tratamientos aplicados al rodal. Letras distintas indican crecimientos significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Año	Por lo Bajo (mm)	Selectivo (mm)	Testigo (mm)
1999-2005	3,38	2,71	2,47
2005-2012	3,01 (a)	2,29 (b)	1,90 (c)

A nivel de rodal todas las situaciones presentan un decrecimiento, que alcanza a 11,03% 15,41% y 23,08%, para el raleo por lo bajo, selectivo y testigo respectivamente.

4.1.2 Incremento en Área Basal, Volumen y Biomasa

Durante el período de estudio 2005 – 2012, se encontró un incremento de todas las variables a nivel individual para cada uno de los tratamientos realizados, incluso en el tratamiento testigo.

Dado lo anterior, se reconoce que una proporción del incremento se debe a crecimiento normal del bosque, en tanto la diferencia respecto del testigo puede ser atribuible al tratamiento silvicultural aplicado.

Cuadro 6. Existencias en, área basal, volumen y biomasa a nivel individual para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

Tratamientos de raleo	Año 2005			Año 2012		
	G m ² /árb	V m ³ /árb	B t/árb	G m ² /árb	V m ³ /árb	B t/árb
Raleo por lo bajo	0,05	0,34	0,23	0,06	0,37	0,29
Raleo selectivo	0,04	0,30	0,19	0,05	0,33	0,23
Testigo	0,03	0,24	0,13	0,03	0,27	0,15

Cuadro 7. Cambio en las existencias de área basal, volumen y biomasa a nivel individual entre los años 2005 y 2012.

Tratamientos de raleo	Diferencia 2005-2012		
	G m ² /árb	V m ³ /árb	B t/árb
Raleo por lo bajo		0,01	0,04
Raleo selectivo		0,01	0,03
Testigo		0,00	0,02

- **Área basal:** El tratamiento de raleo por lo bajo es el que mostró el mayor incremento, superando por 0,002 m²/árb de área basal al raleo selectivo. Ambos tratamientos, a su vez, fueron superiores al rodal testigo. Porcentualmente, los incrementos a nivel individual fueron de 17,90%, 16,54% y 14,16% para tratamiento de raleo por lo bajo, selectivo, y testigo, respectivamente.
- **Volumen:** El tratamiento de raleo selectivo fue el que obtuvo los mayores incrementos, superando por 0,01 m³/árb al tratamiento de raleo selectivo y en 0,02 m³/árb al rodal testigo. En forma relativa, los árboles de cada rodal incrementaron su volumen en 10,98%, 9,28% y 9,04% para los tratamientos de raleo por lo bajo, selectivo y testigo, respectivamente.
- **Biomasa:** El tratamiento de raleo selectivo fue el que obtuvo los mayores incrementos, superando por 0,01 t/árb al tratamiento de raleo selectivo y en 0,03 t/árb al rodal testigo. En forma relativa, los árboles de cada rodal incrementaron su biomasa aérea en 23,35%,

18,73% y 17,32% para los tratamientos de raleo por lo bajo, selectivo y testigo, respectivamente.

4.2 CRECIMIENTO A NIVEL DE RODAL

Se presentan los crecimientos encontrados a nivel de rodal. En estos, se debe considerar que existió una diferencia por mortalidad de entre 25 y 35% de los árboles con tratamiento de raleo selectivo y testigo, que será abordado en la sección 5.3.

4.2.1 Área basal y diámetro cuadrático medio

En relación al área basal, así como al diámetro cuadrático medio, se calcularon los valores presentados en la siguiente tabla. Los valores de densidad de ambos años son posteriores al raleo. La diferencia en densidad se debe a las parcelas de medición¹ y a efectos de mortalidad.

Cuadro 8. Existencias en número de árboles, área basal y diámetro cuadrático medio de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

Tratamientos de raleo	Año 2005			Año 2012		
	N/ha	G m ² /ha	DCM cm	N/ha	G m ² /ha	DCM cm
Raleo por lo bajo	804	38,5	24,7	813	45,9	26,8
Raleo selectivo	1.339	54,4	22,7	961	45,5	24,6
Testigo	1.928	57,3	19,5	1.344	45,6	20,8

- **Área basal:** Entre el año 2005 y 2012 sólo se incrementa el área basal del rodal en el tratamiento de raleo por lo bajo, alcanzando el 24,1% de aumento. Contrario a lo anterior, los otros tratamientos presentaron decrementos del área basal en -16,3% y 20,4%, para el tratamiento de raleo selectivo y testigo, respectivamente.
- **Diámetro medio cuadrático (DCM):** En todos los tratamientos se constata un incremento en el DCM, calculado en 8,6%, 8,0% y 6,8% para los tratamientos por lo bajo, selectivo, y testigo, respectivamente.

¹ Las parcelas, al no ser fijas, pueden presentar ligeras variaciones en cuanto al número de árboles por hectárea calculados.

4.2.2 Incremento Volumen y Biomasa aérea

El Cuadro 9 presenta las existencias totales en número de árboles, área basal, volumen y biomasa por rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo. En los apéndices 1 y 2 se presenta el detalle de las tablas de rodal para los distintos tratamientos.

Cuadro 9. Existencias en número de árboles, volumen y biomasa de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

Tratamientos de raleo	Año 2005			Año 2012		
	N/ha	V m ³ /ha	B t/ha	N/ha	V m ³ /ha	B t/ha
Raleo por lo bajo	804	270	186	813	303	232
Raleo selectivo	1.339	408	257	961	320	219
Testigo	1.928	471	247	1.344	358	202

Del Cuadro 9 se puede derivar lo siguiente:

- **Mortalidad:** Entre el año 2005 y 2012 se observa una pérdida por mortalidad en los tratamientos selectivo y testigo, alcanzando el 28,2% y 30,3% respectivamente. En contraste, el tratamiento de raleo por lo bajo no presenta mortalidad.
- **Volumen:** Entre el año 2005 y 2012 sólo se incrementa el volumen bruto del rodal en el tratamiento de raleo por lo bajo, alcanzando el 12,3% (33,3 m³/ha) de aumento. Por otra parte, los otros tratamientos presentaron decrementos del volumen bruto del rodal en 21,7% y 24,1%, para el tratamiento raleo selectivo y testigo, respectivamente. Esto origina un crecimiento medio anual en volumen bruto de 4,8 m³/ha/año para el tratamiento de raleo por lo bajo, en el caso de los tratamientos de raleo selectivo y testigo, se genera un decrecimiento a nivel de rodal de 8,4 y 16,2 m³/ha/año, respectivamente.
- **Biomasa:** Entre el año 2005 y 2012 se incrementa la biomasa bruta del rodal sólo en el tratamiento de raleo por lo bajo, alcanzando el 24,9% de aumento. Por otra parte, los otros tratamientos presentaron decrementos de la biomasa del rodal en 14,9% y 18,1%, para el tratamiento raleo selectivo y testigo, respectivamente. Esto origina un crecimiento medio anual en biomasa de 6,6 t/ha/año para el tratamiento de raleo por lo bajo, en el caso de los tratamientos de raleo selectivo y testigo, se genera un decrecimiento a nivel de rodal de 5,5 y 6,4 t/ha/año, respectivamente.

4.3 CAPTURA DE CARBONO AÉREO Y EL EFECTO DE LOS RALEOS

El Cuadro 10 presenta el contenido total y la captura de carbono de la biomasa aérea para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo. La captura de carbono es expresada como la media anual del período de medición.

Cuadro 10. Contenido total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

TRATAMIENTOS DE RALEO	Año 2005			Año 2012		Captura de Carbono	
	Fuste C t/ha	Copa C t/ha	Total C t/ha	Fuste C t/ha	Copa C t/ha	Total C t/ha	t/ha/año
Raleo por lo bajo	75,99	12,22	88,20	93,20	17,00	110,20	3,14
Raleo selectivo	106,53	15,64	122,17	89,64	14,30	103,94	-2,60
Testigo	103,88	13,27	117,15	84,62	11,31	95,93	-3,03

Del Cuadro 10 se puede derivar lo siguiente:

Entre el año 2005 y 2012 se incrementa el contenido de C del rodal sólo en el tratamiento de raleo por lo bajo, alcanzando el 24,9% de aumento, equivalente a 22,0 t/ha. Por otra parte, los otros tratamientos presentaron decrementos del contenido total de C del rodal en -14,9% (-18,23 t/ha) y -18,1% (-21,22 t/ha), para el tratamiento raleo selectivo y testigo, respectivamente.

La mayor proporción de ganancia – o pérdida – de contenido de carbono a nivel de rodal está dada por el contenido en la sección fustal. En el raleo por lo bajo, el incremento fustal explica el 78,2% del incremento total. En el raleo selectivo, la reducción en contenido de carbono fustal explica el 92,6% de la disminución total. Finalmente, en el testigo, la reducción en la sección del fuste representa el 90,8% de la disminución del contenido de carbono en el rodal.

5 DISCUSIÓN

5.1 CRECIMIENTO A NIVEL INDIVIDUAL

A nivel individual se observó en todos los tratamientos un incremento de todas las variables de análisis, lo que se condice con una disminución en la competencia intraespecífica provocada por los tratamientos silviculturales y la disminución de la densidad por caída de individuos.

5.1.1 Incremento Diamétrico

Los incrementos diametrales obtenidos en general se ajustan a lo descrito por los diferentes autores (título 1.1.3), mostrando resultados cercanos a 2 mm de incremento anual por individuo en un rodal sin tratamiento.

Se debe considerar que la respuesta media de crecimiento originada por los diferentes tratamientos aplicados al rodal puede estar afectados por el tipo de árbol residual. Así, si los individuos residuales son en su mayoría dominantes, con ausencia de competencia de copas, es probable que demuestren menor significancia estadística en los tratamientos que uno donde los residuales sean árboles no dominantes liberados. Dicho de otro modo, al mantener árboles que ya eran parte de los estratos superiores, no se esperaría un crecimiento explosivo al ser liberados. Por otro lado, se debe considerar que la reacción a los raleos está determinada por la capacidad de respuesta del rodal, asociada principalmente a la edad de los individuos

En un ámbito similar, se vislumbra que los tratamientos de raleo por lo bajo y raleo selectivo poseen una media de crecimiento, previa al raleo, superior a la del testigo. Esto no implica que los rodales se desarrollen en sitios distintos o que no sean comparables entre sí, o que efectivamente tuvieran tasas de crecimiento superiores al rodal testigo.—Esto más bien se debería a que los árboles muestras para el cálculo de crecimiento provienen de la población de árboles residuales, generalmente conformada por individuos de mayor posición social en el rodal, cuyos crecimientos sería mayores. Esto determina que no representen a todo el colectivo del rodal inicial, pudiendo así sobreestimarse el crecimiento diamétrico. Esto es particularmente válido para el raleo por lo bajo.

5.1.2 Crecimiento Anual Corriente (CAC) y Crecimiento Anual Medio (CAM)

Al comparar muestras individuales de crecimiento, se constata que las tasas de crecimiento medias (CAM) al momento de la intervención ya eran superiores a las tasas corrientes de crecimiento anual (CAC).

Cabe destacar que todos los tratamientos (incluido el testigo) presentaron decrementos respecto de la tasa de crecimiento registrada en el año 2005, previa intervención, se asume que existen variables externas a la intervención que influyen en dicho comportamiento, como la edad, viento, precipitaciones, entre otros.

Tomando de ejemplo los tarugos testigo T30 y T33, desde la médula a corteza se cuentan 70 y 37 años, respectivamente. En ambos casos se verifica una tendencia a la disminución del CAC por debajo del CAM alrededor de los 20 años, señalando el punto de inicio de competencia intraespecífica (Figura 2).

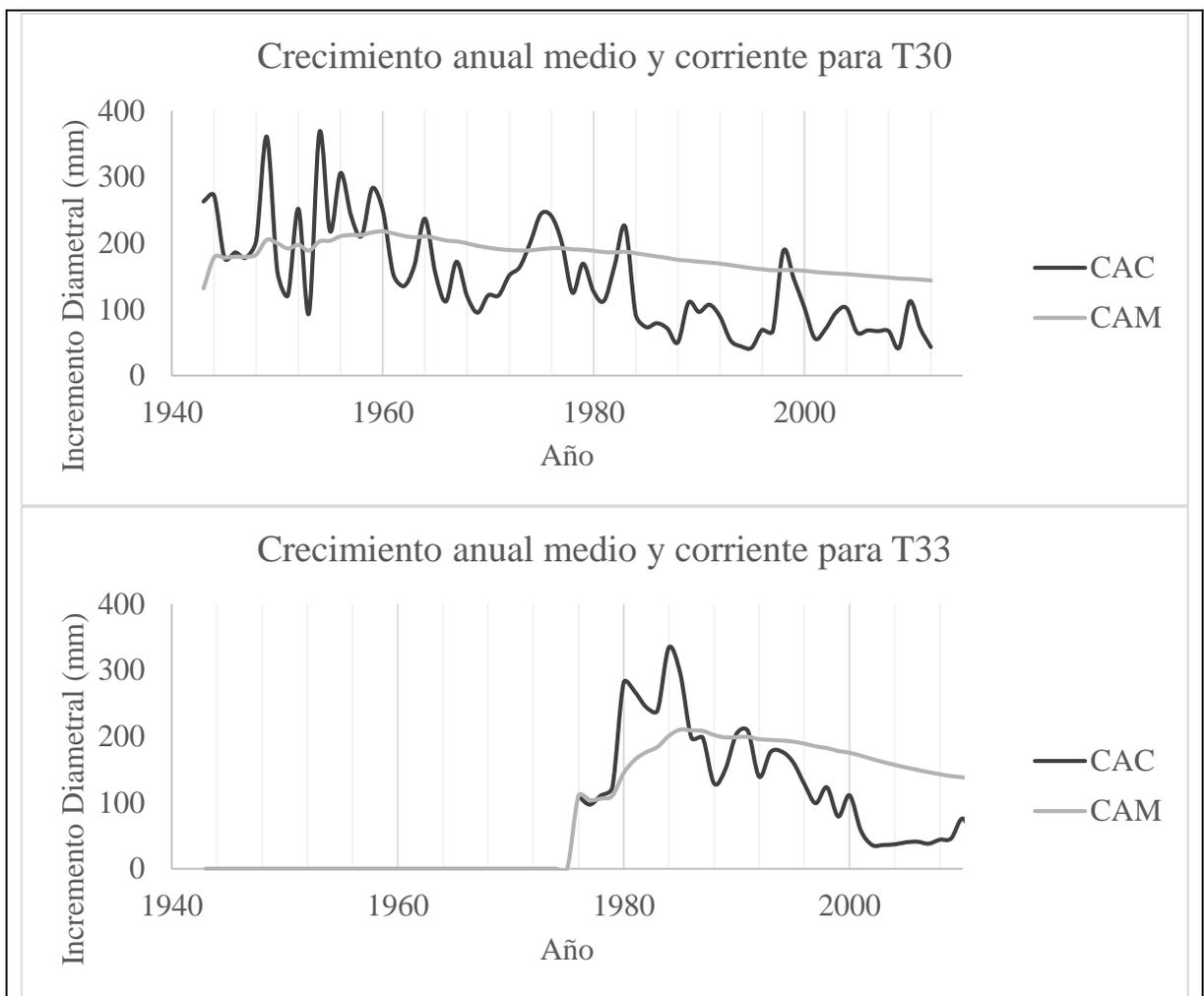


Figura 2. Comportamiento del CAC y CAM para dos árboles de *N. betuloides* representativos de la población testigo. Para los tarugos T30 y T33 se cuentan 70 y 37 años, respectivamente.

5.1.3 Incremento en Área Basal, Volumen y Biomasa

5.1.3.1 Área Basal

En general los incrementos obtenidos en área basal son de mayor magnitud relativa en el tratamiento de raleo por lo bajo. En contraste, el raleo selectivo presentó incrementos sólo ligeramente superiores por individuo respecto del incremento de los árboles del rodal testigo.

5.1.3.2 Volumen

A nivel individual, en promedio los árboles aumentaron su volumen en 0,04 m³, 0,03 m³ y 0,02 m³ por árbol para los tratamientos por lo bajo, selectivo, y testigo, respectivamente. Si se considera que el rodal testigo naturalmente incrementó el volumen promedio por individuo en 9,0%, se deduce que la mejora con tratamiento es de 2 puntos porcentuales para el raleo por lo bajo, y 0,3 puntos porcentuales para el raleo selectivo.

Lo anterior indica los beneficios potenciales del tratamiento de raleo por lo bajo si el objetivo es lograr una mejora a nivel de individuo. No obstante, el mayor incremento en volumen a nivel de rodal se obtiene con el rodal testigo. Esto debido, a que el incremento alcanzado a nivel individual en el raleo por lo bajo no es capaz de compensar la pérdida de densidad del rodal residual por efecto del raleo (capítulo 4.2)

5.1.3.3 Biomasa

Los árboles remanentes incrementaron su biomasa en un promedio de 0,05 t, 0,04 t y 0,02 t por cada individuo, para los tratamientos por lo bajo, selectivo y testigo, respectivamente. Este incremento se condice con su incremento diametral y volumétrico.

Los individuos del rodal testigo en promedio incrementaron su biomasa en 17,3% respecto de su estado en el año 2005. Dado lo anterior, las mejoras relativas en el incremento atribuibles a los tratamientos silviculturales corresponden a 6,0% para el raleo por lo bajo, y 1,4% para el raleo selectivo.

5.2 CRECIMIENTO A NIVEL DE RODAL

A diferencia de los análisis logrados con base en el crecimiento individual, al analizar las magnitudes de cambio a nivel de rodal, se encuentra que éstas disminuyeron respecto del estado inicial en gran parte de los parámetros estudiados, sobre todo en los rodales de tratamiento selectivo y testigo.

El principal motivo de disminución en los parámetros a nivel de rodal se condice con una disminución de la densidad a lo largo del tiempo, provocada por disturbios, tópico que será ahondado en el capítulo 5.3.

5.2.1 Área Basal

El área basal del rodal con Tratamiento Por lo Bajo mostró resultados superiores a autores como Márquez (2011), obteniendo $0,38 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{año}$ más que lo previamente registrado.

Para los tratamientos de Raleo Selectivo y Rodal Testigo el área basal mostró decrementos a nivel de rodal, sin embargo, estos no pueden ser directamente relacionados a la capacidad de respuesta de los rodales, así como tampoco puede extrapolarse un decremento por individuo, dado que en ambos casos existió una disminución en la densidad en alrededor de 30 puntos porcentuales respecto de la situación inicial (año 2005).

5.2.2 Crecimiento Anual Corriente (CAC) y Crecimiento Anual Medio (CAM)

Pese a que los árboles sí aumentaron su crecimiento en forma individual, el valor de CAC no supera la media histórica de crecimiento de los árboles, arrojando luces de una intervención tardía. Empero, la existencia de factores ajenos al desarrollo de la investigación, tales como la mortalidad por caída, dificultan la atribución de la falta de respuesta sólo a la edad del rodal al momento de su intervención.

El análisis gráfico del comportamiento de CAC/CAM para los tratamientos de raleo Por lo Bajo y Selectivo, indican que el CAC medio siempre se encuentra por debajo del CAM, visualizando que los rodales no tuvieron capacidad de recuperación de crecimiento superior a la media histórica.

Es necesario destacar que la gráfica de crecimiento de los tratamientos (Figura 3) sólo contempla los últimos 37 años, de un promedio de edad de 52,8 años. Lo anterior se debe a la imposibilidad de contabilizar hasta la médula en todos los tarugos, principalmente por pudrición central.

En la figura se aprecia que en ambos tratamientos la tasa tiende a la baja, por lo que se intuye que el tiempo adecuado para la intervención debiere ser de al menos 30 años antes de lo realizado.

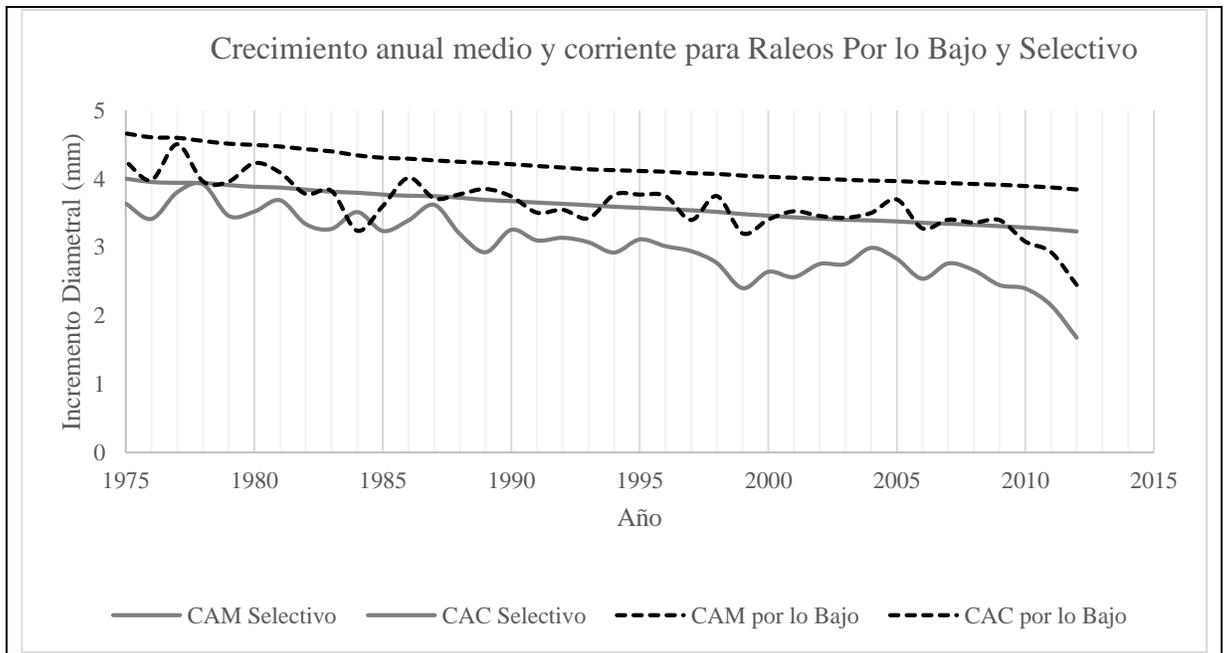


Figura 3. Comportamiento del CAC y CAM para los distintos raleos aplicados.

5.2.3 Incremento Volumen y Biomasa aérea

El volumen y la biomasa encontrada se ubican dentro del rango descrito por otros estudios en el punto 1.1.6, con valores de incremento de alrededor de $4,8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ y $6,6 \text{ t}/\text{ha}/\text{año}$, respectivamente.

Si bien en los resultados se encontró que el tratamiento por lo bajo es el único que realmente posee un incremento de sus variables a nivel de rodal desde el año 2005, no implica que los otros hayan tenido un decremento gradual debido al tratamiento seguido, sino que hubo una mortalidad relevante que provocó mermas a nivel de rodal tanto en el bosque con tratamiento de raleo por lo bajo como en el bosque testigo. Bajo el supuesto de que dicha mortalidad no hubiera existido, los resultados absolutos del rodal tienden a ser inversos: El rodal testigo tiene el mayor incremento bruto en sus variables, seguido del raleo selectivo, y finalmente el raleo por lo bajo.

5.3 MORTALIDAD

Se reconoce la mortalidad como un factor activo crítico en la interpretación de resultados, pues los altos niveles de merma provocan disminución drástica de los valores a nivel de rodal, pese a que los resultados a nivel individual indican un cambio positivo en las tasas de crecimiento.

Como se menciona en la sección 3.1.2, los vientos son un fenómeno recurrente en la zona (Peri *et al.*, 2002), por lo que es relevante el análisis de la caída de entre el 25 y 35% de los árboles en los rodales con tratamiento de raleo selectivo y testigo, respectivamente, lo que condiciona una disminución de las existencias totales de rodal.

Como la caída ocurrió tanto en el raleo de menor intensidad (selectivo) como en el rodal testigo, no se considera, que la intervención sea la causa principal de la caída. No considerar los presentes niveles de caída puede llevar a sesgos relevantes en la interpretación de resultados a nivel de rodal, ya que es factible subestimar los efectos de los tratamientos, o, inclusive, sobreestimar un tratamiento que no haya tenido mortalidad.

Se presume que la caída de los árboles del presente estudio se debe directamente a la acción perturbadora del viento, la cual afecta a rodales manejados y sin manejar (Figura 4). En relación a lo expuesto, se consideraba que la apertura de dosel debido a los raleos, podría afectar la estabilidad del rodal frente a efectos del viento. Esto debido a que el raleo cambia la estructura del rodal disminuyendo la protección colectiva de los árboles frente al viento. Sin embargo, los resultados muestran que el tratamiento de raleo por lo bajo podría haber estabilizado el bosque remanente, evitando la presencia de árboles suprimidos o con defectos, que al caer podrían haber causado reacciones en cadena de apertura de claros, derrumbe sobre otros árboles, y daños a árboles remanentes. Esto último guarda relación con lo expuesto por Peri *et al.* (2013), explicando que en bosques de lenga se ha encontrado que raleos de baja densidad pueden ser capaces de disminuir las caídas masivas debido a viento, además de minimizar el impacto visual de los tratamientos silviculturales.



Figura 4. Imagen general de caída de árboles en el sitio de estudio.

La caída de árboles en dos de los tres tratamientos representaría un problema en la interpretación de los resultados. Esto debido a que sólo se puede presumir que las intensidades de raleo fueron la causa de resistencia o no del rodal al viento. No obstante, pueden existir causas no estudiadas como es el caso de la microgeografía, cercanía a caminos o particularidades de la trayectoria del viento.

Basado en lo recién expuesto, se considera que la caída no prevista de árboles es una debilidad del estudio, por lo que, para futuros ensayos en zonas con presencia datada de ráfagas de viento, se propone establecer r ensayos con más de una replicación por tratamiento, de modo de asegurar que cualquier efecto no considerado pueda atribuirse con mayor certeza a una fuente determinada. Si bien el presente ensayo posee una réplica en torno a 10 km de distancia, ésta no fue medida en el proceso de obtención de datos de esta memoria.

5.4 CAPTURA Y EQUIVALENCIA DE CARBONO

5.4.1 Captura aérea de Carbono

El secuestro de carbono obtenido a nivel de rodal en los resultados no es directamente interpretable como una consecuencia de los tratamientos. Esto debido a la disminución de la densidad y pérdida de biomasa por efecto de la mortalidad a nivel de rodal. La pérdida en la captura de carbono registrada se debe principalmente a la caída de árboles, y, además, existe una emisión no evaluada debido a la descomposición de la materia leñosa caída.

Dado lo anterior, todo modelo de proyección de desarrollo de biomasa y captura de carbono que se haga debería incorporar la probabilidad de ocurrencia de disturbios, el período de retorno y la magnitud (t/ha) del disturbio en el tiempo, como se aproxima Pukkala (2017), integrando las tasas de sobrevivencia de los árboles dentro del rodal en sus proyecciones.

Por otro lado, la disminución en la captura de carbono no puede ser interpretado como una liberación de este, sino como un cese en la potencial captura respecto del año 2005. Es decir, pese a que el cálculo muestre una tasa decreciente de C, interpretable como una emisión, en la práctica sólo cesó el secuestro aéreo por parte de los árboles que murieron en ese período.

De no haber existido caída y bajo el supuesto que los crecimientos medidos hubieren sido los mismos, los niveles de incremento en biomasa y captura de carbono serían ligeramente superiores a nivel de rodal en el raleo selectivo. Cabe señalar que las variables de *stock* fueron siempre mayores en el tratamiento de raleo selectivo, pero sólo por su mayor densidad (≈ 1.250 árb/ha) respecto del rodal con raleo por lo bajo (≈ 800 árb/ha). No obstante, se debe mantener en consideración que aún sin tratamientos existe una mortalidad natural atribuible a la dinámica propia de los bosques.

Al generar una función de ajuste de la proporción de caída y el número de árboles por hectárea, se encontró que, si la caída por viento o nieve estuviere fuertemente influenciada por la densidad del rodal, la tasa de caída debería ser nula en un rodal con 750 árb/ha, valor cercano a la densidad del rodal con raleo por lo bajo, en el cual se dejaron 804 árb/ha al momento de la intervención. Sin embargo, la caída de árboles puede deberse a una multiplicidad de factores

de los cuales no se conoce la proporción de su efecto, a saber, ráfagas de viento, condiciones microgeográficas, canales de viento, profundidad del suelo, entre otros.

El presente estudio muestra que los tratamientos silviculturales se perfilan como una forma apropiada de aumentar el secuestro de carbono de los árboles, aún en consideración de la probabilidad de perturbaciones externas, especialmente en bosques con especies de maderas denominadas “nobles”, utilizadas principalmente en mueblería y artículos de uso prolongado, minimizando la reemisión por combustión del CO₂ capturado.

5.4.2 Equivalencia de Carbono Capturado

De los resultados obtenidos, se puede extrapolar que por cada hectárea con bosque de *N. betuloides*, se captura cierta cantidad de combustible utilizado, o bien, podría anularse su emisión futura.

Debido a la tendencia observada tanto en la emisión per cápita como en la emisión a nivel país (Figura 5) se plantea como fortaleza del estudio el presentar la cuantificación del aporte a la mitigación de la liberación de CO₂, permitiendo así una decisión evaluada respecto de la aplicación de tratamientos silviculturales con diversos fines.

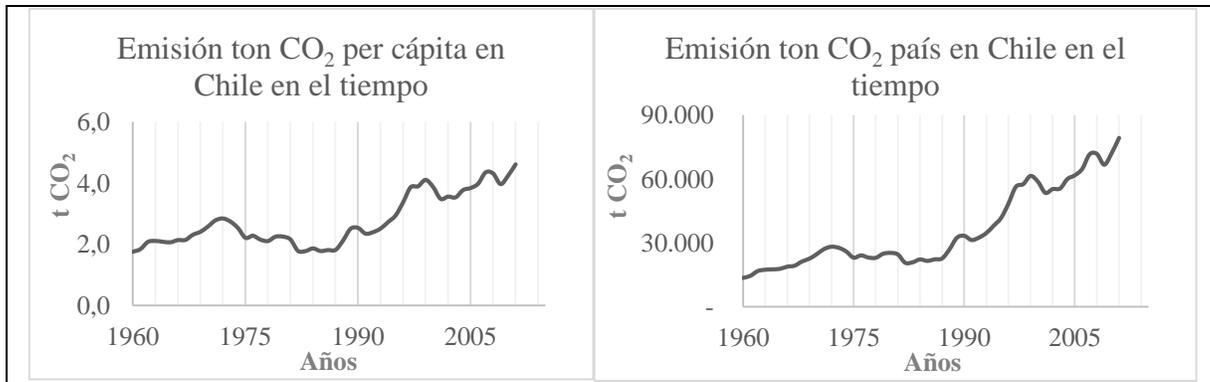


Figura 5. Emisión de carbono histórica per cápita y a nivel país en Chile. Elaboración propia con datos de Banco Mundial (2016).

Dado que toda la equivalencia está definida por los niveles de captura de carbono, y éstos a su vez son determinados por el incremento de la biomasa aérea del bosque, se considera en escenarios de caída se pueden generar al menos dos formas de aproximarse a un escenario sin caída (Apéndice VI).

Basado en los datos de cambio climático publicados por el Ministerio de Medioambiente (2016), se estima que el manejo de los renovales de Tipo Forestal Coihue de Magallanes (199.978 ha) con raleo por lo bajo, podría capturar al menos el 79,6% de las emisiones de CO₂ eq de la Región de Magallanes cada año (SNI MMA, 2017).

6 CONCLUSIONES

El efecto de los raleos en un bosque secundario de *Nothofagus betuloides* resultó ser estadísticamente significativa y directamente proporcional a la intensidad del raleo.

A nivel individual, se registraron incrementos en las tasas de crecimiento y captura de carbono, siendo el raleo por lo bajo el que obtuvo los mejores resultados. No obstante, a nivel de rodal, ninguno de los tratamientos, incluido el testigo, obtuvo una mejora en el crecimiento anual respecto de las tasas de crecimiento anterior. Esto debido a una alta mortalidad por caídas por viento. Se observó que la tasa máxima de crecimiento diamétrico individual ocurre aproximadamente a los 20 años. Considerando que la edad media de los individuos era de 53 años, y que la respuesta de los rodales con tratamiento ante el raleo fue escasa, se estima que la intervención resultó ser tardía.

El mejor resultado se logró con el tratamiento de raleo por lo bajo, con una extracción inicial del 36,78% del área basal, calculándose crecimientos de 3,01 mm/año en diámetro, 1,1 m²/ha/año en área basal, 10,7 m³/ha/año en volumen, 8,2 t/ha/año en biomasa aérea, y 3,1 t/ha/año de captura de carbono atmosférico. Para los rodales con tratamiento con raleo selectivo y rodal testigo, a nivel de rodal se registró una disminución en los parámetros de volumen (-8,4 y -16,2 m³/ha/año), biomasa (-5,5 y -6,4 t/ha/año) y captura de carbono (-2,60 u -3,03 t/ha/año), debido a una alta mortalidad por la caída de árboles, la que alcanzó 28,2% y 33,8%, respectivamente.

Los bosques sin manejo logran capturar entre el 45² y el 50³% de las emisiones de CO₂ eq de la Región de Magallanes. En tanto, si se manejan los bosques renovales de *Nothofagus betuloides* en la Región, se lograría alcanzar una captura de 627.931 t/año, valor que corresponde al 79,6% del CO₂ eq de las emisiones regionales, mejorando entre 30 y 35% la condición actual.

² SNI MMA, 2017.

³ Valor calculado con los datos de la presente memoria.

7 BIBLIOGRAFÍA

CANAVOS, G. 1988. Probabilidad y Estadísticas. Aplicaciones y Métodos. McGrawHill/Interamericana de México. México. 651 p.

CONAF, 2017. Cifras oficiales Catastro de Vegetación. Base de datos.

CRUZ, G. y CALDENTEY, J. 2007. Caracterización, Silvicultura y Uso de los Bosques de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides*) en la XII Región de Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 126 p.

DI CASTRI, F. y HAJEK, E. 1976. Bioclimatología de Chile. Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 128 p.

DÍAZ, C. AVILÉS, C. y ROBERTS, R. 1960. Los grandes grupos de suelos en la Provincia de Magallanes. Agricultura Técnica. Años XIX y XX. Ministerio de Agricultura. Chile.

DOLLENZ, O. 1980. Estudios fitosociológicos en el Archipiélago Cabo de Hornos. I Revelamientos en Caleta Lientur. Isla Wellington y surgidero Pomache, Isla Bayly. Anales del Instituto Patagónico, Punta Arenas, Chile. Vol. 12, p. 173-182.

DOLLENZ, O. 1995. Los árboles y bosques de Magallanes. Ediciones Universidad de Magallanes. Punta Arenas, Chile. 123 p.

DONOSO, C. 1981. Tipos Forestales de los bosques nativos de Chile. Documento de trabajo N° 38. Investigación y Desarrollo Forestal (CONAF/PNUD/FAO). Publicación FAO, Chile. 82 p.

DONOSO, C. y J. ATIENZA H. 1984. Hibridación natural entre especies de *Nothofagus* siempreverdes en Chile. *Bosque*, vol. 5, N° 1, p. 21-34.

ESKUCHE, U. 1968. Fisonomía y sociología de los bosques de *Nothofagus dombeyi* en la región de Nahuel Huapi. *Vegetatio* 16(14). p 192-204.

GAJARDO, R. 1994. La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 121 p.

GARDINER, B. y QUINE, C. 2000. Forest Ecology and Management. Volumen 135, cap. 1–3, 15. 261-277.

GERDING, V. y THIERS, O. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. Rev. chil. hist. nat., vol.75, n.4, p 819-833.

GTZ-CONAF. 1998. Experiencia silvicultural del bosque nativo de Chile. Recopilación de antecedentes para 57 especies arbóreas y evaluación de prácticas silviculturales. Publicaciones Lo Castillo S.A., Santiago, Chile. 410 p.

IBARRA, M. CRUZ, G. CALDENTEY, J. y CABELLO, G. 2007. El Tipo Forestal Coihue de Magallanes en la XII Región. En: Cruz, G. y Caldente J. (ed.). 2007. Caracterización, Silvicultura y Usos de los Bosques de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides*) en la XII Región. Universidad de Chile. Santiago. p 12-24.

IDE 2016. Capas de información geográfica. Clima y Atmósfera. Disponible en línea <<http://www.ide.cl/descarga/capas/category/clima-y-atmosfera.html>>

INFOR. 2017. Anuario Forestal. Boletín Estadístico N° 159. Santiago, Chile. 188 p.

INIA. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 221p.

MÁRQUEZ, S. 2011. Crecimiento y captura de carbono aéreo en bosques secundarios de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst, en la Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes. Memoria de Título de Ingeniería Forestal. Departamento de Silvicultura y de Conservación de la naturaleza. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 44 p.

MARTÍNEZ – PASTUR, G.; CELLINI, J.; LENCINAS, M.; VUKASOVIC, R.; PERI, P. y DONOSO, S. 2002. Responses of *Nothofagus betuloides* to different thinning intensities in Tierra del Fuego (Argentina). Interciencia 27: 679-685.

MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE – MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES – GEF, 2016. Segundo informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático. Santiago. Chile. 283 p.

PERI, P.; MARTÍNEZ – PASTUR, G.; VUKASOVIC, R.; DÍAZ, B.; LENCINAS, M. y CELLINI, J. M. 2002. Thinning schedules to reduce risk of windthrow in *Nothofagus pumilio* forest of Patagonia, Argentina. *Bosque*, Vol. 23 N°2 pp 19-28.

PERI, P.; MARTÍNEZ – PASTUR, G. y MONELOS, L. 2013. Natural dynamics and thinning response of young lenga (*Nothofagus pumilio*) trees in secondary forests of Southern Patagonia. *Bosque*, Vol. 34 N°3 pp 273 – 279.

PISANO, E. 1977. Fitogeografía de Tierra del Fuego– Patagonia Chilena. I Comunidades vegetales entre la latitud 52° y 56° S. Punta. Arenas, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia* 8: 121-250.

PISANO, E. 1978. Establecimiento de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Blume (Coihue de Magallanes) en un valle en procesos de desglaciación. *Anales Instituto de la Patagonia* 12: 150-171.

PISANO, E. 1994. Sectorización Fitogeográfica del archipiélago Sud Patagónico V: Sintaxonomía y distribución de las unidades de Vegetación. Punta. Arenas, Chile. *Anales Instituto de la Patagonia* 21: 5-33.

PREMOLI, A. y BREWER, C. 2007. Environmental v. Genetically Driven Variation in Ecophysiological Traits of *Nothofagus pumilio* from Contrasting Elevations. *Australian Journal of Botany*, 55, p 585-591.

PUKKALA, T. 2017. Does management improve the carbón balance of forestry? *Institute of Chartered Foresters. United Kingdom, Forestry* 90, p 125-135.

QUIROGA, P., VIDAL RUSSEL, R., PREMOLI, A. 2005. Evidencia morfológica e isoenzimática de hibridación natural entre *Nothofagus antarctica* y *N. pumilio* en el noroeste Patagónico. *Bosque* 26(2), p 25-32.

RAMIREZ, C. y FIGUEROA, H. 1985. "Delimitación ecosociológica del bosque valdiviano (Chile) mediante análisis estadísticos multivariados". *Studia Oecologica* 6: 69-82.

RODRÍGUEZ, R.; MATTHEI, O. y QUEZADA, M. 1983. Flora arbórea de Chile. Editorial de la Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 408 p.

ROMANYÀ, J., FONTS, J., SAURAS-YERA, T., GUTIÉRREZ, E. y VALLEJO, V. 2005. Soil-plant relationships and tree distribution in old growth *Nothofagus betuloides* and *Nothofagus pumilio* forests of Tierra del Fuego. *Geoderma*, 124, p 169-180.

SCHMIDT, H. y CALDENTEY, J. 1994. Apuntes, Tercer Curso “Silvicultura de los bosques de Lengua”. CONAF, CORMA, Universidad de Chile. 95 p.

SCHMIDT, H. y CRUZ, G. 2007. Sistemas silviculturales aplicables en los bosques de coihue de Magallanes. En: Cruz, G. y Caldentey J. (ed.). 2007. Caracterización, Silvicultura y Usos de los Bosques de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides*) en la XII Región. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 51-74.

SILVA, J. 1997. Crecimiento y acumulación de biomasa en renovales de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides* (Mirb.), Oerst) en el sector de Río San Juan, XII Región. Memoria de Título de Ingeniería Forestal. Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. <http://www.snichile.cl/contenido/magallanesago>, Chile. 64 p.

SNI MMA, 2017. Inventario Regional de Gases de Efecto Invernadero para la Región de Magallanes. Disponible en línea <<http://www.snichile.cl/contenido/magallanes>>.

STECCONI, M., MARCHELLI, P., PUNTIERI, J., PICCA, P., GALLO, L. 2004. Natural hybridization between a deciduous (*Nothofagus antarctica*, Nothofagaceae) and an evergreen (*N. dombeyi*) forest tree species: evidence from morphological and isoenzymatic traits. *Annals of Botany* 94: 775-786.

THIERS, O. 1997. Estudio de relaciones entre los bosques de Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides* (Mirt.)) y el suelo en Tierra del Fuego. Memoria de Título de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 101 p.

UCHILE-AGRIMED, 2017. Atlas agroclimático de Chile Tomo VI: Regiones de Aysén y Magallanes. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 132 p.

VALDÉS, A. 2012. Estimación del contenido y balance de carbono en un bosque de *Nothofagus pumilio* y una turbera de *Sphagnum* en Tierra del Fuego, Chile. Seminario de Título, Biología Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

VIÑA CONCHA Y TORO, 2017. Reporte de Sustentabilidad: Huella de Carbono 2017. Disponible en línea <<https://www.conchaytoro.com/sustentabilidad/huella-de-carbono/>>.

VUKASOVIC, R., MARTÍNEZ PASTUR, G., PERI, P., LENCINAS, M., CELLINI, J. y DIAZ, B. 2001. Dinámica, crecimiento y respuesta a raleos comerciales en bosques secundarios de *Nothofagus betuloides* en Tierra del Fuego (Argentina). Actas XX reunión de la Asociación Argentina de Ecología. 242 p.

VITA, A. 1996. Los tratamientos silviculturales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 2ª ed.

YOUNG, S. 1972. Subantarctic rain forest of Magellanic Chile: Distribution, composition, and age and growth rate studies of common forest trees. Antarctic Research Series. U.S., 20: 307-322

8 APÉNDICES

APÉNDICE I

Cuadro 11. Tablas de rodal y existencias en área basal del raleo por lo bajo para el año 2012.

Clase (cm)	Nha (árb/ha)	Nha relativo (%)	Gha (m ² /ha)	Gha relativo (%)
0-10	0	0,00	0,00	0,00
10-20	182	21,95	3,22	6,62
20-30	381	45,96	18,70	38,50
30-40	249	30,04	23,96	49,31
40-50	17	2,05	2,70	5,57
	829	100,00	48,58	100,00

Cuadro 12. Existencias en biomasa por componente del raleo por lo bajo para el año 2012.

Componente	Masa Árbol		Masa Rodal
	ln(Kg/árb)	Kg/árb	t/ha
Función Árbol Completo	5,68	292,68	242,63
Función Fuste	5,53	252,77	209,55
Función Copa	3,85	46,93	38,91
Total Suma de Funciones Medias		299,70	248,45
Función Madera	5,42	226,26	187,57
Función Corteza	3,26	26,16	21,68
Suma Componentes Fuste		252,42	209,26
Función Ramas	3,73	41,69	34,56
Función Hojas	1,76	5,84	4,84
Suma Componentes Copa		47,53	39,40
Total Suma de Funciones Individuales		299,95	248,66

APÉNDICE II

Cuadro 13. Tablas de rodal y existencias en área basal del raleo selectivo para el año 2012.

Clase (cm)	Nha (árb/ha)	Nha relativo (%)	Gha (m ² /ha)	Gha relativo (%)
0-10	33	3,43	0,06	0,14
10-20	298	30,98	5,27	11,45
20-30	448	46,57	21,99	47,81
30-40	166	17,26	15,97	34,72
40-50	17	1,77	2,70	5,88
	962	100,00	46,00	100,00

Cuadro 14. Existencias en biomasa por componente del raleo selectivo para el año 2012.

Componente	Masa Árbol		Masa Rodal
	ln(Kg/árb)	Kg/árb	t/ha
Función Árbol Completo	5,44	229,52	220,80
Función Fuste	5,29	199,03	191,47
Función Copa	3,50	33,08	31,83
Total Suma de Funciones Medias		232,12	223,30
Función Madera	5,18	177,62	170,87
Función Corteza	3,04	21,00	20,20
Suma Componentes Fuste		198,62	191,07
Función Ramas	3,30	27,01	25,98
Función Hojas	1,57	4,83	4,65
Suma Componentes Copa		31,84	30,63
Total Suma de Funciones Individuales		230,46	221,70

APÉNDICE III

Cuadro 15. Tablas de rodal y existencias en área basal del testigo para el año 2012.

Clase (cm)	Nha (árb/ha)	Nha relativo (%)	Gha (m ² /ha)	Gha relativo (%)
0-10	216	16,68	0,42	1,00
10-20	730	56,37	12,90	30,32
20-30	166	12,82	8,15	19,15
30-40	149	11,51	14,34	33,69
40-50	17	1,31	2,70	6,35
50-60	17	1,31	4,04	9,49
	1295	100,00	42,55	100,00

Cuadro 16. Existencias en biomasa por componente del testigo para el año 2012.

Componente	Masa Árbol		Masa Rodal
	ln(kg/árb)	kg/árb	t/ha
Función Árbol Completo	4,99	146,60	189,85
Función Fuste		4,85 128,09	165,87
Función Copa		2,91 18,38	23,80
Total Suma de Funciones Medias		146,47	189,67
Función Madera		4,73 113,66	147,19
Función Corteza		2,64 14,00	18,13
Suma Componentes Fuste		127,67	165,33
Función Ramas		2,60 13,41	17,37
Función Hojas		1,22 3,40	4,40
Suma Componentes Copa		16,81	21,77
Total Suma de Funciones Individuales		144,48	187,10

APÉNDICE IV

Cuadro 17. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el tratamiento de raleo por lo bajo, para los años 2005 y 2012.

Componente	Contenido Carbono	2012	2005	Tasa Media
	%	t/ha	t/ha	t/ha/año
Función Árbol Completo	47,7	115,73	90,92	3,54
Función Fuste	47,5	99,53	78,51	3,00
Función Copa	47,8	18,60	13,14	0,78
Total Suma de Funciones Medias		118,13	91,65	3,78
Función Madera	45,5	89,10	70,07	2,72
Función Corteza	47,5	10,30	8,28	0,29
Suma Componentes Fuste		99,40	78,35	3,01
Función Ramas	47,5	16,42	10,67	0,82
Función Hojas	48,1	2,33	1,93	0,06
Suma Componentes Copa		18,74	12,60	0,88
Total Suma de Funciones Individuales		118,14	90,95	3,89

Cuadro 18. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el tratamiento de raleo selectivo, para los años 2005 y 2012.

Componente	Contenido Carbono	2012	2005	Tasa Media
	%	t/ha	t/ha	t/ha/año
Función Árbol Completo	47,7	105,32	120,67	-2,19
Función Fuste	47,5	90,95	104,54	-1,94
Función Copa	47,8	15,21	22,89	-1,10
Total Suma de Funciones Medias		106,16	127,44	-3,04
Función Madera	45,5	81,16	93,07	-1,70
Función Corteza	47,5	9,59	11,20	-0,23
Suma Componentes Fuste		90,76	104,27	-1,93
Función Ramas	47,5	12,34	12,48	-0,02
Función Hojas	48,1	2,23	2,67	-0,06
Suma Componentes Copa		14,58	15,15	-0,08
Total Suma de Funciones Individuales		105,33	119,42	-2,01

Cuadro 19. Contenido de carbono por componente a nivel de rodal, en el rodal testigo, para los años 2005 y 2012.

Componente	Contenido Carbono	2012	2005	Tasa Media
	%	t/ha	t/ha	t·ha ⁻¹ ·año ⁻¹
Función Árbol Completo	47,7	90,56	119,58	-4,15
Función Fuste	47,5	78,79	104,25	-3,64
Función Copa	47,8	11,38	14,65	-0,47
Total Suma de Funciones Medias		90,17	118,90	-4,11
Función Madera	45,5	69,92	92,37	-3,21
Función Corteza	47,5	8,61	11,51	-0,41
Suma Componentes Fuste		78,53	103,88	-3,62
Función Ramas	47,5	8,25	10,40	-0,31
Función Hojas	48,1	2,12	2,87	-0,11
Suma Componentes Copa		10,37	13,27	-0,41
Total Suma de Funciones Individuales		88,90	117,15	-4,04

APÉNDICE V

Crecimiento Potencial

Utilizando los mismos métodos, con la salvedad de homologar el número de árboles por hectárea con el preexistente en 2005, se calcularon las existencias de rodal en área basal, volumen y biomasa. El objetivo de este cálculo es contrastar con una existencia potencial en caso de no haber existido mortalidad.

Cuadro 20. Existencias potenciales en área basal, volumen y biomasa de los rodales para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

Tratamientos de raleo	Año 2005				Año 2012			
	N/ha	G m ² /ha	V m ³ /ha	B t/ha	N/ha	G m ² /ha	V m ³ /ha	B t/ha
Raleo por lo bajo	804	38,50	269,79	185,64	804	45,35	299,7	229,37
Raleo selectivo	1339	54,40	408,43	257,12	1339	63,41	445,4	304,82
Testigo	1928	57,30	471,26	246,55	1344	65,40	513,0	289,63

Cuadro 21. Incremento potencial en área basal, volumen y biomasa de los rodales entre los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

Tratamientos de raleo	Mortalidad	Incremento porcentual 2005-2012			Incremento absoluto 2005-2012		
		G	V	B	G m ² /ha/año	V m ³ /ha/año	B t/ha/año
Raleo por lo bajo	0,0%	17,8%	11,1%	23,6%	1,0	4,3	6,2
Raleo selectivo	0,0%	16,6%	9,1%	18,6%	1,3	5,3	6,8
Testigo	0,0%	14,1%	8,9%	17,5%	1,2	6,0	6,2

En relación a la captura de Carbono

- Captura Mínima

Sin desmedro de lo expuesto, y pese a que en los tratamientos de raleo selectivo y testigo hubo una mortalidad considerable, los árboles que no sufrieron caída sí tienen una tasa de captura positiva, que es de al menos 2,3 t/ha al año en el tratamiento selectivo y de al menos 2,04 en el testigo. Se destaca que la información de captura mínima se condice con los resultados obtenidos, siendo aún el tratamiento de raleo por lo bajo el que alcanza los mayores incrementos a nivel de rodal.

Cuadro 22. Contenido mínimo total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

TRATAMIENTOS DE RALEO	Año 2005			Año 2012			Captura de Carbono
	Fuste C	Copa C	Total C	Fuste C	Copa C	Total C	t/ ha/año
	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	
Raleo por lo bajo	76,84	12,35	89,19	93,20	17,00	110,20	3,00
Raleo selectivo	76,46	11,22	87,68	89,64	14,30	103,94	2,32
Testigo	72,41	9,25	81,66	84,62	11,31	95,93	2,04

- Captura Potencial

Utilizando los mismos métodos, con la salvedad de homologar el número de árboles por hectárea con el preexistente en 2005, se calcularon las existencias potenciales del rodal a nivel de captura de carbono. El objetivo de este cálculo es contrastar con una existencia potencial en caso de no haber existido mortalidad.

Bajo este escenario hipotético de no mortalidad, el rodal con raleo selectivo sería el que posee la mayor tasa de captura de carbono para el período estudiado, sin embargo, en forma proporcional a las existencias previas, es el rodal con raleo el que más aumenta, con incrementos de 23,6%, seguido del rodal con raleo por lo bajo con un incremento de 18,5% y finalmente el rodal testigo con un aumento de 17,5%.

Dadas las diferencias con lo obtenido en los resultados, es necesario plantear la duda de si la mortalidad ocurrida puede haber sido predispuesta por el tipo de tratamiento, ya que, de no existir una predisposición a dicha mortalidad, el tratamiento de raleo selectivo podría ser la mejor opción para captura de carbono tanto a nivel de rodal como a nivel individual.

Cuadro 23. Contenido potencial total de carbono de la biomasa aérea (fuste y copa) para los años 2005 y 2012, según los distintos tratamientos de raleo.

TRATAMIENTOS DE RALEO	Año 2005			Año 2012			Capt. Carbono t/ha/año
	Fuste C t/ha	Copa C t/ha	Total C t/ha	Fuste C t/ha	Copa C t/ha	Total C t/ha	
Raleo por lo bajo	75,99	12,22	88,20	92,17	16,81	108,98	3,14
Raleo selectivo	106,53	15,64	122,17	124,90	19,93	144,83	3,24
Testigo	103,88	13,27	117,15	121,39	16,22	137,62	2,92

APÉNDICE VI

Para el tratamiento de raleo por lo bajo, se encontró que por cada hectárea, anualmente se captura el equivalente al uso durante 1 año de un vehículo en ciudad⁴. Bajo la misma comparación, al aplicar raleo selectivo la captura es el equivalente a sólo 9 meses de uso, y sin hacer tratamientos se reduce a 8 meses (Cuadro 24).

Cuadro 24. Equivalencia mínima de carbono emitido por diferentes combustibles. Fuente: Elaboración Propia con datos de IAP, 2011.

Combustible	Emisiones		Por lo Bajo	Selectivo	Testigo	
	U ⁵	Kg CO ₂ /m ³	Kg CO ₂ /t	U/ha	U/ha	U/ha
Gasolina para vehículos	l	2.241	3.070	1.338,7	1.035,3	910,3
Kerosene de aviación	l	2.554	3.153	1.174,6	908,4	798,7
Diésel	l	2.676	3.186	1.121,1	867,0	762,3
Petróleo combustible	l	2.927	3.127	1.034,8	800,3	703,7
Gas licuado de petróleo	l	1.642	2.985	1.015,2	785,1	690,4
Gas natural	m ³	1,97		1.024,9	792,6	697,0
Carbón bituminoso	Kg		2.441	1.005,0	777,2	683,4
Carbón sub-bituminoso	Kg		1.816	1.522,8	1.177,7	1.035,5

En un análisis similar, serían requeridas en torno a 75.018 ha de bosque renoval de *N. betuloides* (38% de la existencia en Magallanes) para mitigar la huella anual de carbono de industrias vitivinícolas medianas a grandes en Chile (Viña Concha y Toro, 2017).

Por otra parte, en relación a las emisiones locales (Región de Magallanes y la Antártica Chilena), se encontró que las superficies de renoval manejadas serían capaces de cubrir el 78,5% del CO₂ eq de la Región. Se considera que, por ejemplo, es una de las regiones con más alto factor de emisión en relación a sistemas eléctricos, con rangos de entre 0,72 y 1,09 Kg CO₂ eq/KWh, en contraste con el Sistema Interconectado Central con 0,32 Kg CO₂ eq/KWh. Una causa explicada por Estay y Ovalle (2017) es que más del 98% de la generación eléctrica en la Región está basada en consumo de combustibles fósiles.

⁴ Se asume un uso promedio de 20.000 km/año y rendimiento de 15 km/litro de combustible para vehículo.

⁵ Siendo U = Unidad, puede asumir: litros (l) para combustibles líquidos; metros cúbicos (m³) para combustibles gaseosos; kilogramos (Kg) para combustibles sólidos.