

INFLUENCIA DEL CLIMA SOBRE EL CRECIMIENTO DE ROBLE (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) Y RESILIENCIA DE LA ESPECIE FRENTE A LAS SEQUÍAS EN EL CENTRO-SUR DE CHILE



Informe Técnico N° 232



INFLUENCIA DEL CLIMA SOBRE CRECIMIENTO DE ROBLE (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) Y RESILIENCIA DE LA ESPECIE FRENTE A LAS SEQUIAS EN EL CENTRO-SUR DE CHILE

Rocío Urrutia Jalabert¹ y Yasna Rojas Ponce¹

**INSTITUTO FORESTAL
2020**

¹ Investigadoras, Instituto Forestal, Sede los Ríos, Chile. rurrutia@infor.cl



INFOR

Instituto Forestal

Sucre 2397 Ñuñoa

Santiago, CHILE

F: 223667115

www.infor.cl

ISBN N° 978-956-318-168-5

Registro Propiedad Intelectual N° 2020-A-10439

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando se efectúe la cita correspondiente:

Urrutia Jalabert, Rocío y Rojas Ponce, Yasna, 2020. Influencia del Clima Sobre el Crecimiento de Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) y Resiliencia de la Especie Frente a las Sequías en el Centro-Sur de Chile. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 232. P. 21.

Este Informe Técnico se elaboró en base a la publicación científica:

Urrutia-Jalabert, R., J. Barichivich, V. Rozas, A. Lara, Y. Rojas, C. Bahamondez, M. Rojas-Badilla, T. Gipoulou-Zuñiga, E. Cuq. 2021. Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile. Forest Ecology and Management: 485, 118962, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118962>.

Las fotografías e imágenes incorporadas en tapas o texto de la presente publicación fueron obtenidas o elaboradas durante el desarrollo de las actividades del trabajo que origina esta publicación.

ÍNDICE

PRÓLOGO	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	9
3. METODOLOGÍA	9
3.1. Muestreo en los Sitios de Estudio	9
3.2. Relaciones entre el Crecimiento y el Clima	11
3.3. Resiliencia del Crecimiento a las Sequías	11
3.4. Cambios en la Productividad Primaria a lo Largo del Gradiente Latitudinal en la Cordillera de Los Andes	12
4. RESULTADOS	13
4.1. Relación entre el Crecimiento de Roble y el Clima	13
4.2. Resiliencia del Crecimiento de Roble a las Sequías	15
4.3. Cambios en la Productividad Primaria a lo Largo del Gradiente Latitudinal en la Cordillera de Los Andes	17
5. CONCLUSIONES	18
RECONOCIMIENTOS	18
REFERENCIAS	19

PRÓLOGO

El cambio climático global está generando alteraciones en las principales variables de clima que influyen los bosques, como las precipitaciones anuales y su distribución, y las temperaturas medias y máximas.

En la zona central y sur de Chile se han reducido las precipitaciones y se han producido aumentos moderados de las temperaturas. Se suma a esto un prolongado período de sequía que está afectando a esta zona del país desde el año 2010, con precipitaciones significativamente inferiores a las medias.

Diferentes especies forestales exóticas y nativas que conforman los recursos forestales chilenos, están ya resintiendo estos cambios, especialmente los referidos a las menores precipitaciones, y muestran ciertas reducciones en sus ritmos de crecimiento anual.

Los bosques nativos correspondientes al Tipo Forestal Roble - Raulí - Coigüe (Ro-Ra-Co), y en especial sus renovales o bosques de segundo crecimiento, son considerados como bosques comerciales de importante potencial maderero dadas sus tasas de crecimiento y la calidad de sus maderas para variados usos.

Atendida la importancia de estos recursos, el Instituto Forestal (INFOR) está desarrollando investigaciones orientadas a evaluar el efecto del cambio climático sobre el desarrollo de estas especies y la resiliencia que estas puedan mostrar ante las variaciones en las principales variables de clima, en especial frente a las restricciones hídricas.

Se trata de los primeros estudios al respecto en bosques productivos en el país e INFOR tiene el agrado de presentar este Informe Técnico con resultados obtenidos para roble, una de las especies madereras más importantes del bosque nativo chileno.



Fernando Raga Castellanos
Director Ejecutivo
Instituto Forestal

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la escasez hídrica asociada están causando la disminución en el crecimiento diamétrico de muchas especies arbóreas e incrementando la mortalidad en bosques de distintos lugares del mundo (Allen *et al.*, 2010, 2015; Sánchez-Salguero *et al.*, 2012).

El cambio climático en el centro-sur de Chile está caracterizado por la disminución de las precipitaciones y el aumento moderado de las temperaturas (Trenberth *et al.*, 2007; Falvey and Garreaud, 2009; Gonzalez-Reyes y Muñoz, 2013). Además, desde 2010 ha estado ocurriendo la sequía más prolongada desde que hay registro, conocida como la megasequía, la cual está afectando principalmente el territorio entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía, con déficits de precipitación que fluctúan entre 25 y 45% (CR2, 2015; Garreaud *et al.*, 2019). Las sequías en el país están siendo además cada vez más frecuentes en las últimas décadas, comparado con lo que ocurría en siglos anteriores (Morales *et al.*, 2020).

En Chile y Argentina se ha reportado que el crecimiento de especies nativas, tales como ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.Serm. & Bizzarri), araucaria (*Araucaria araucana* Mol.), alerce (*Fitzroya cupressoides* (Molina) I.M.Johnst.) y lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser), ha disminuido especialmente en décadas recientes, lo cual ha estado asociado al desecamiento y calentamiento en el área (Villalba *et al.*, 2012; Rodríguez-Catón *et al.*, 2015; Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015; Camarero and Fajardo, 2017; Fajardo *et al.*, 2019). Este desecamiento ha afectado también el crecimiento del roble de Santiago (*Nothofagus macrocarpa* (A.DC.) F.M.Vázquez & R.A.Rodr.), especialmente desde 1980 (Venegas-González *et al.* 2018a, 2018b, 2019).

Hasta el momento no ha habido estudios que hayan evaluado cómo el clima influencia el crecimiento de renovales de importancia productiva en Chile. Los renovales o bosques de segundo crecimiento del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.; *Nothofagus alpina* (Poepp. & Endl.) Oerst.; *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.), son considerados los de mayor potencial maderero del país debido a sus mayores tasas de crecimiento y calidad de su madera (Donoso *et al.*, 1993).

Roble por su parte, es una de las especies más explotadas en el sur de Chile, posee una madera de buena calidad para la construcción y para otros fines de alto valor, y posee una distribución más continua y a más baja altitud (susceptible de sufrir condiciones más secas), comparada con las otras dos especies de este tipo forestal (CONAF, 1998; Rojas *et al.*, 2013).

Roble es una especie pionera y dominante en muchos bosques, por lo que tiene un rol irremplazable en la etapa inicial, donde con su sombra da paso al establecimiento de otras especies más tolerantes a la falta de luz, y así a la diversificación del ecosistema (Rojas *et al.*, 2013).

Los renovales de esta especie constituyen un recurso productivo en sí, pero además son la base para el desarrollo de bosques adultos de diversos estratos, los cuales cumplen el rol fundamental de proveer una serie de bienes y servicios ambientales (Lara *et al.*, 2003).

2. OBJETIVOS

Debido a la importancia de la especie roble y a que no existen estudios que hayan evaluado cómo el cambio climático puede afectar su crecimiento, los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Evaluar la relación entre el crecimiento radial (en ancho de anillos) y el clima en renovales de roble a lo largo de su distribución en la Cordillera de Los Andes.
- Evaluar la resiliencia del crecimiento de roble a las sequías ocurridas en décadas recientes y si las poblaciones creciendo en el norte de su distribución han sido afectadas por la megasequía.
- Evaluar si existe alguna tendencia en la productividad primaria de estos renovales durante las últimas dos décadas, a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para todo el gradiente latitudinal en la Cordillera de los Andes.

3. METODOLOGÍA

3.1 Muestreo en los Sitios de Estudio

Para estudiar el crecimiento de la especie se instalaron parcelas de 1000 m² en nueve sitios a lo largo de un gradiente latitudinal en la Cordillera de Los Andes, desde la región del Maule a la de Los Ríos (35,7° - 40,3° S) (Figura N° 1). En cada una de estas parcelas se midieron los diámetros a la altura del pecho (DAP) de todos los individuos (≥ 10 cm) y se colectaron dos tarugos de crecimiento en al menos 25 árboles dominantes de roble (≥ 30 cm de DAP) (Figura N° 2).

Los sitios de estudio corresponden a Parque Natural Tricahue (TRI) y El Melado (MEL), en Maule; Rucamanqui (RUC) y Los Prados (LPR), en Bío Bío; Valle Hermoso (VAH) y Namuncai (NAM), en La Araucanía; y el predio San Pablo de Tregua (SPT), el Fundo Arquihue (ARQ) y el Fundo Riñinahue (RIN) en Los Ríos (Figura N° 1).



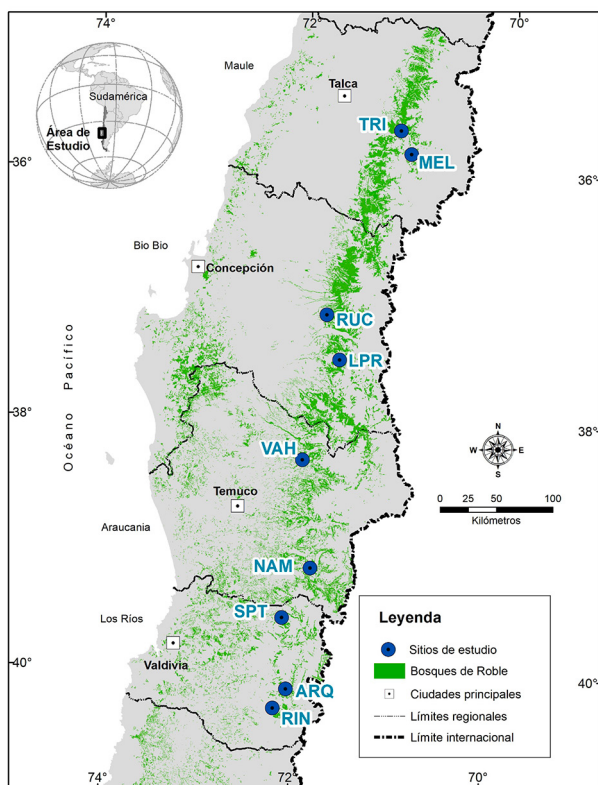


Figura N° 1
DISTRIBUCIÓN DE BOSQUES DE ROBLE Y SITIOS DE ESTUDIO



Figura N° 2
MUESTREO DE TARUGOS DE CRECIMIENTO EN SITIO EL MELADO, REGIÓN DE MAULE
Y MUESTRA OBTENIDA CON EL TALADRO DE INCREMENTO

Las muestras colectadas en cada sitio fueron montadas y lijadas de forma de hacer visible los anillos de crecimiento. Una vez lijadas se procedió a su fechado y cofechado visual para asegurar una correcta asignación de años a cada uno de los anillos.

Se midió el ancho de cada anillo usando un carro de medición Velmex (Inc., Bloomfield NY, USA) y posteriormente el cofechado fue corroborado con el programa COFECHA (Holmes, 1983).

Luego de este procedimiento, se realizó la estandarización de cada una de las muestras por sitio ajustando una curva exponencial negativa o regresión lineal, de forma de eliminar el efecto de la disminución del crecimiento por la edad. Esto se realizó usando el programa ARSTAN44xp (Cook y Krusic, 2005). La cronología de ancho de anillos final en cada sitio corresponde al promedio de todas las muestras estandarizadas.

3.2 Relaciones entre el Crecimiento y el Clima

Las cronologías de ancho de anillos estandarizadas de cada uno de los sitios fueron correlacionadas (coeficiente de correlación de Pearson) con datos de precipitación y temperaturas máximas regionales.

Para los datos climáticos se utilizaron los promedios de distintas estaciones meteorológicas dentro de cada región (considerando las desviaciones con respecto a la media de un período común para cada región). Los períodos de análisis fueron distintos dependiendo de la extensión de los datos meteorológicos en cada zona.

Los datos climáticos utilizados fueron mensuales y también anuales y estacionales de primavera (septiembre a marzo) y verano (diciembre a marzo y diciembre a febrero).

3.3 Resiliencia del Crecimiento a las Sequías

Para evaluar la resiliencia del crecimiento a las sequías, primeramente se definieron los años de sequía durante el período 1967-2010 utilizando el Índice de Sequía de Palmer, donde índices menores a -2 indican sequías moderadas a extremas (Palmer, 1965). Además, sólo sequías también registradas a través del Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) fueron consideradas en los análisis siguientes. El período post-2010 de megasequía no pudo ser considerado, pues aún no existe una recuperación hacia condiciones climáticas normales.

Considerando estos años de sequía se calcularon tres índices de resiliencia desarrollados por Lloret *et al.* (2011). Estos corresponden a los índices de Resistencia (Rt), Recuperación (Rc) y Resiliencia (Rs) propiamente tal, los cuales se definen de la siguiente forma:

$$R_t = \text{Seq}/\text{PreSeq}; R_c = \text{PostSeq}/\text{Seq}; R_s = \text{PostSeq}/\text{PreSeq}$$

Donde:

Seq, Preseq y Postseq corresponden al crecimiento durante la sequía, al crecimiento promedio tres años previos y al crecimiento promedio tres años después de la

sequía, respectivamente. El promedio de los índices para los distintos años de sequía constituye el índice de cada sitio. En este Informe sólo se presentarán los resultados asociados al Índice de Resiliencia. Para detalles acerca de los otros índices, referirse a la publicación científica que da origen a este Informe Técnico.

Por último, se evaluó la tendencia en incremento en área basal (calculado usando los anchos de anillos y el DAP de cada roble muestreado) en los dos sitios del norte (Tricahue y Melado), para las últimas tres décadas. Esto, pues estos bosques se encuentran más expuestos a condiciones mediterráneas con menor precipitación durante la temporada de crecimiento y son también de mayor edad, lo cual determina que su tendencia de crecimiento no se encuentre influenciada por la competencia debido al cierre de dosel.

El incremento en área basal promedio de un rodal permite mostrar la variación en el crecimiento de los árboles vivos, compensando el efecto de la edad-tamaño causado por la geometría del tronco y manteniendo al mismo tiempo la variación de largo plazo (Biondi, 1999).

3.4 Cambios en la Productividad Primaria a lo Largo del Gradiente Latitudinal en la Cordillera de Los Andes

Para evaluar la tendencia en la productividad primaria o cambios en el verdor de los renovales de roble en toda el área de estudio se seleccionaron las imágenes Terra MODIS (MOD13Q1) desde el sitio AppEEARS Team (2020).

Estas imágenes tienen una resolución de 250 m, se obtienen cada 16 días y se encuentran disponibles desde el año 2000 (Didan, 2015).

De forma de obtener información fenológica de las imágenes, en particular el NDVI máximo entre el inicio y final de cada temporada de crecimiento, se utilizó el software Timesat (Jönsson and Eklundh, 2004).

La variación en el NDVI máximo a lo largo del transecto latitudinal fue calculada para el periodo 2001-2018 y el patrón de variación general se caracterizó a través de un Modelo Aditivo Generalizado (Curtis and Simpson, 2014).

4. RESULTADOS

4.1 Relación entre el Crecimiento de Roble y el Clima

Se encontró que el crecimiento de roble está principalmente influenciado por la precipitación a lo largo de toda su distribución. Así, mientras más llueve, más crecen los árboles. Esta relación se dio en todos los sitios; sin embargo, en Maule la relación fue más fuerte con la precipitación anual, mientras que hacia el sur la precipitación de primavera y verano, fueron más importantes (Cuadro N° 1 y Figura N° 3).

Por su parte, la temperatura máxima afectó negativamente el crecimiento de roble en la mayoría de los sitios. Efectos especialmente negativos se encontraron en El Melado y en el sitio Valle Hermoso en Curacautín, el cual se encuentra más cercano a la Depresión Intermedia (condiciones más secas y calurosas) (Cuadro N° 1 y Figura N° 3).

Resulta interesante que en el caso del sitio El Melado la relación más fuerte se dio con la temperatura máxima del verano anterior (Cuadro N° 1 y Figura N° 3), lo cual se explica pues a medida que aumentan las temperaturas, aumenta la respiración y el metabolismo, por lo que disminuye la acumulación de reservas, las cuales son necesarias para iniciar el crecimiento durante la temporada siguiente (Deslauriers *et al.*, 2014).

Cuadro N° 1
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN MÁXIMOS ENTRE EL CRECIMIENTO EN CADA SITIO Y LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MÁXIMA ESTACIONAL EN LA REGIÓN RESPECTIVA

	TRI	MEL	RUC	LPR	VAH	NAM	SPT	ARQ	RIN
Precipitación									
Anual	0,49	0,44							
Primavera			0,43		0,42	0,28			0,34
Verano				0,32			0,40	0,37	
Temperatura máxima									
Verano	-0,32			-0,3	-0,48			-0,31	
Diciembre						-0,37			
Marzo							-0,39		
Verano previo		-0,43							

Solo se muestran las máximas correlaciones, las cuales son todas significativas al 95%. Los periodos de análisis son distintos para cada cronología y estación climática según la longitud de ambos registros.

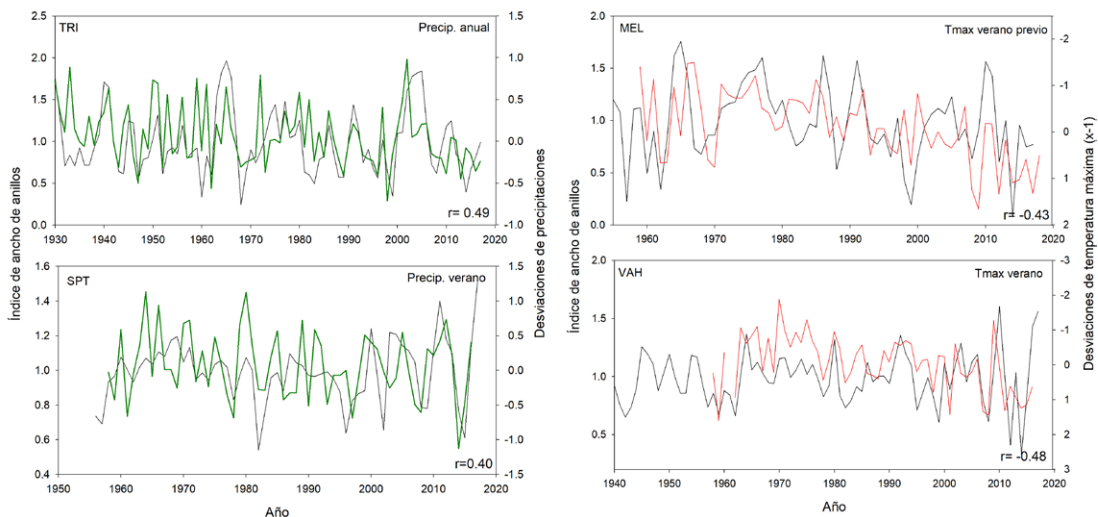


FIGURA N° 3

IZQUIERDA: RELACIÓN ENTRE CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS DEL SITIO TRICAHUE (TRI) Y SAN PABLO DE TREGUA (SPT) EN NEGRO Y LA PRECIPITACIÓN ANUAL Y DE VERANO EN VERDE, RESPECTIVAMENTE. DERECHA: RELACIÓN ENTRE CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS DEL SITIO EL MELADO (MEL) Y VALLE HERMOSO (VAH) EN NEGRO Y LA TEMPERATURA MÁXIMA DEL VERANO PREVIO Y ACTUAL EN ROJO, RESPECTIVAMENTE. LAS CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS SE PRESENTAN EN LA PARTE INFERIOR DERECHA DE CADA GRÁFICO.

4.2 Resiliencia del Crecimiento de Roble a las Sequías

De acuerdo a los análisis realizados, las sequías ocurridas entre los años 1967 y 2010 no han afectado significativamente el crecimiento de los bosques de roble. Sin embargo, existen diferencias entre los sitios estudiados en cuanto a su resiliencia a estos eventos. Los sitios con los árboles más resilientes, es decir donde éstos pueden recuperar y sobrepasar el crecimiento que tenían antes de la sequía, fueron Tricahue (TRI) y El Melado (MEL), los dos ubicados en la Región de Maule y San Pablo de Tregua, ubicado en la Región de Los Ríos (SPT, Figura N° 4). Esto, a pesar de que existen condiciones de suelo restrictivas con abundante presencia de rocas en el caso del sitio Tricahue (Figura N° 5). En el caso de SPT, este es un sitio relativamente plano, con suelos profundos y cercano a un curso de agua, lo cual podría influir en su capacidad de resiliencia.

Por otra parte, el sitio con árboles menos resilientes resultó ser Arquihue (ARQ), lo que puede estar explicado por la exposición norte y la gran pendiente donde está localizado el bosque. Además, el ataque moderado de *Holopterus chilensis* encontrado, podría afectar la capacidad de los árboles para recuperar el crecimiento que tenían antes de la sequía.

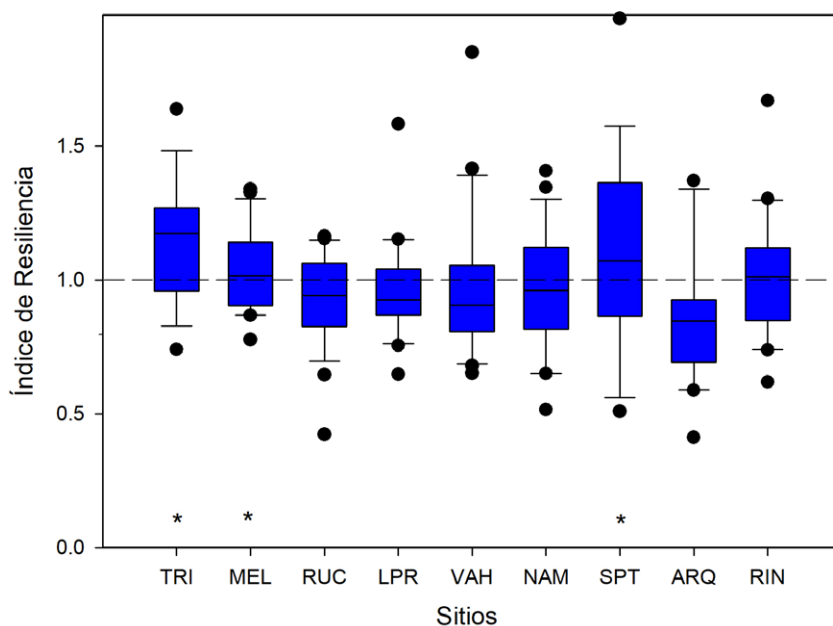


FIGURA N° 4
DIAGRAMA DE CAJAS O BOXPLOT MOSTRANDO EL ÍNDICE DE RESILIENCIA PARA TODOS LOS SITIOS ORDENADOS DE NORTE A SUR (IZQUIERDA A DERECHA). LOS ASTERISCOS ABAJO REPRESENTAN LOS SITIOS CON MAYOR RESILIENCIA Y QUE NO FUERON ESTADÍSTICAMENTE DIFERENTES CONSIDERANDO LA PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS.

Finalmente, considerando los patrones de crecimiento de los rodales de la región de Maule, se encontró que estos no presentaban una disminución pronunciada durante las últimas tres décadas, ni durante el período de la megasequía, lo que estaría indicando que estos bosques, al menos hasta el año 2017, han sido tolerantes a las condiciones más secas impuestas por este fenómeno (Figura N° 6). El hecho de que en estos dos sitios del norte el crecimiento de los árboles sea también más resiliente a la sequía, indica que estos bosques pueden estar adaptados a estas condiciones más secas y verse menos afectados por su ocurrencia.



FIGURA N° 5
PERFILES DE SUELO EN EL SITIO TRICAHUE LOS CUALES DEMUESTRAN LAS CONDICIONES
RESTRICTIVAS DONDE CRECEN LOS ROBLES

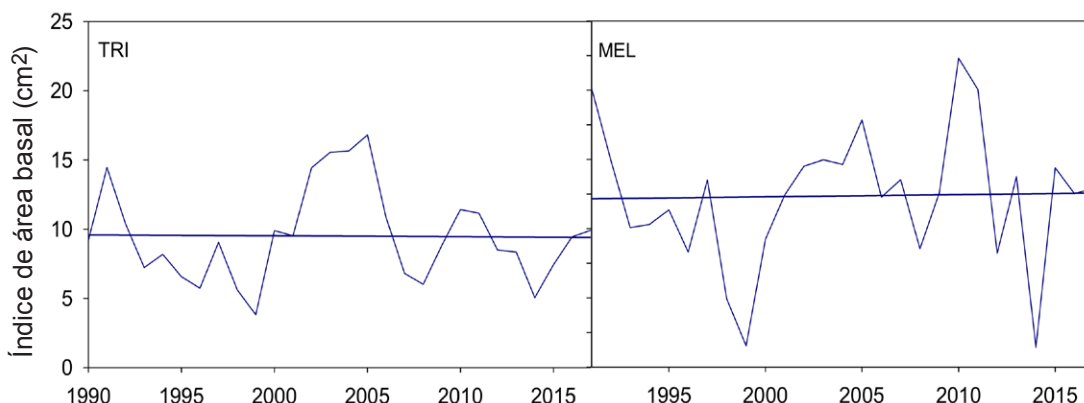


FIGURA N° 6
INCREMENTO EN ÁREA BASAL PARA LOS SITIOS TRICAHUE (TRI) Y EL MELADO (MEL) DESDE 1990. SE
PUEDE OBSERVAR CLARAMENTE QUE NO HAY TENDENCIA A LA DISMINUCIÓN EN EL CRECIMIENTO,
NI CRECIMIENTOS MÁS BAJOS DURANTE LA MEGASEQUÍA (2010-2017), COMPARADO CON LA
DÉCADA DE LOS 90.

4.3 Cambios en la Productividad Primaria a lo Largo del Gradiente Latitudinal en la Cordillera de Los Andes

El estudio de los cambios en el NDVI de los renovales de roble durante las últimas dos décadas (2001-2018) indica que ha habido un aumento en el verdor del bosque al norte de los 35,5° S y al sur de los 38° S, mientras que no ha habido cambios en productividad entre los 36 y 38° S (sur de Maule y sur del Bío Bío, Figura N° 7).

El cambio observado en la zona norte debe ser tomado con precaución porque podría ser un efecto de los bosques menos densos y el uso intensivo del bosque y del suelo en esa área. Por otra parte, el aumento en el verdor observado al sur de los 38° S no puede descartarse que sea un efecto de una eventual fertilización por CO₂ (Zhu *et al*, 2016). Sin embargo, es probable que se deba a cambios en el desarrollo del rodal, debido al cierre de las copas en estos renovales.

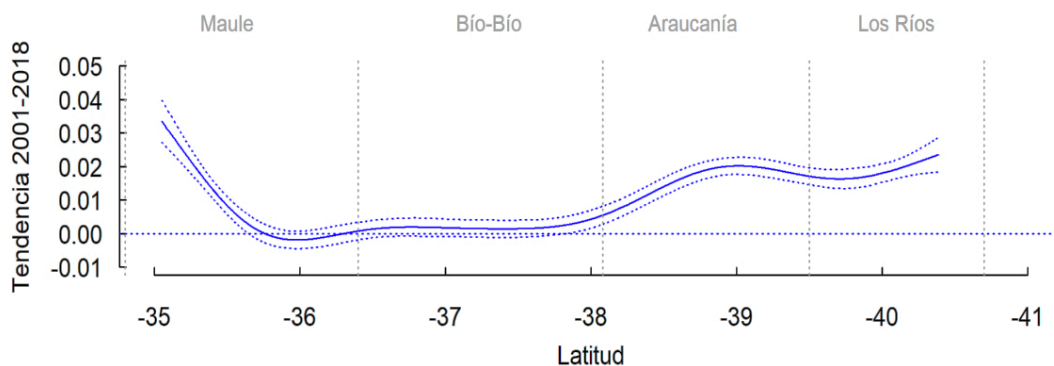


FIGURA N° 7
PERFIL LATITUDINAL DE LA TENDENCIA EN EL NDVI MÁXIMO DE RENOVALES DE ROBLE PARA EL PERÍODO 2001-2018. PARA CADA LATITUD SE CALCULÓ LA MEDIA DE TODOS LOS PÍXELES DOMINADOS POR ROBLE A NIVEL LONGITUDINAL Y LUEGO SE CALCULÓ LA TENDENCIA LINEAL. EL CAMBIO EN LA TENDENCIA FUE MODELADO USANDO UN MODELO ADITIVO GENERALIZADO. LAS LÍNEAS PUNTEADAS REFLEJAN UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 90%.

5. CONCLUSIONES

A partir de este estudio se pudo constatar que la precipitación influencia positivamente el crecimiento de roble a lo largo de toda su distribución en la Cordillera de Los Andes. La temperatura máxima por otra parte, tiene un efecto negativo en el crecimiento de los árboles en la mayor parte de los sitios. Esto implica que las condiciones más secas y calurosas proyectadas para el centro-sur de Chile tendrán probablemente un efecto negativo en el crecimiento de la especie.

Se encontró que las sequías ocurridas hasta el año 2010 no han impactado fuertemente el crecimiento de roble en la Cordillera de Los Andes. Sin embargo, la resiliencia de roble a la sequía, es decir la capacidad de recuperar el crecimiento que se tenía antes del evento, fue mayor en las poblaciones del norte (región de Maule) y en una población del sur creciendo en un sitio con suelos profundos y con buen acceso a humedad (región de Los Ríos). Aún no es posible evaluar la resiliencia del crecimiento de la especie a la megasequía (2010-2020), pues este evento se encuentra vigente y no ha existido una recuperación frente a él.

Resulta necesario instalar ensayos silviculturales que permitan determinar la composición boscosa y los manejos más adecuados para hacer frente a las sequías y también a las olas de calor, eventos que serán cada vez más frecuentes en el futuro. Por otra parte, resulta importante evaluar los efectos del cambio climático en la especie, más allá de lo que ocurre con su crecimiento, para conocer la real vulnerabilidad de roble a este fenómeno.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a los proyectos PAI-ANID de Inserción en el Sector Productivo 7818I20003; ANID/FONDAP 15110009, ARBOLES ANID-NERC-UK NE/SE011811/1 y Fondecyt de Iniciación 11200710. Se agradece a Luis Barrales, Alex Moeller y Rodrigo Guiñez por su apoyo en terreno y a los propietarios y organizaciones que permitieron trabajar en sus predios: Parque Natural Tricahue, Forestal Mininco, Fundo Los Prados (Quilleco), Juan Carlos Rossolini, Reserva Namuncaí, Universidad Austral de Chile (Fundo San Pablo de Tregua), Fundo Arquihue y Fundo Riñinahue.

REFERENCIAS

Allen, C.; Macalady, A.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D. D.; Hogg, E. H.; González, P.; Fensham, R.; Zhang, Z.; Castro, J.; Demidova, N.; Lim, J.H.; Allard, G.; Running, S.W.; Semerci, A. and Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *For, Ecol, Manage*, 259, 660–684.

Allen, C. D.; Breshears, D. D. and McDowell, N. G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene, *Ecosphere* 6, 1–55, doi:10.1890/ES15-00203.1.

AppEEARS Team, 2020. Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS)), Ver. 2.41, NASA EOSDIS L. Process, Distrib, Act, Arch, Cent, (LP DAAC), USGS/Earth Resour, Obs, Sci, Center, Sioux Falls, South Dakota, USA, Available at: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears>.

Biondi, F., 1999. Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecol. Appl.* 9, 216–227. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0216:CTRCAR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0216:CTRCAR]2.0.CO;2)

Camarero, J. J. and Fajardo, A., 2017. Poor acclimation to current drier climate of the long-lived tree species *Fitzroya cupressoides* in the temperate rainforest of southern Chile, *Agric, For, Meteorol*, 239, 141–150, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.003.

CONAF, 1998. Experiencia Silvicultural del Bosque Nativo de Chile, Santiago, Chile.

Cook, E. and Krusic, P., 2005. Program ARSTAN: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University. Available at <http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/trl/public/publicSoftware.html>

CR2, 2015. Report to the Nation. The 2010–2015 mega-drought: A lesson for the future. Available at: www.cr2.cl/megasequia,

Curtis, C. and Simpson, G., 2014. Trends in bulk deposition of acidity in the UK, 1988–2007, assessed using additive models, *Ecol, Indic*, 37, 274–286.

Deslauriers, A.; Beaulieu, M.; Balducci, L.; Giovannelli, A.; Gagnon, M. J. and Rossi, S., 2014. Impact of warming and drought on carbon balance related to wood formation in black spruce. *Ann, Bot.* 114, 335–345. doi:10.1093/aob/mcu111.

Didan, K., 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006, NASA EOSDIS L. Process, DAAC. Available at: NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

Donoso, P.; Donoso, C. and Sandoval, V., 1993. Proposición de zonas de crecimiento de renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución natural, *Bosque* 14, 37–55, doi:10.4206/bosque.1993.v14n2-06.

Fajardo, A.; Gazol, A.; Mayr, C. and Camarero, J. J., 2019. Recent decadal drought reverts warming - triggered growth enhancement in contrasting climates in the southern Andes tree line. *J. Biogeogr*, 46, 1367–1379. doi:10.1111/jbi.13580.

Falvey, M. and Garreaud, R. D., 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J. Geophys, Res*, 114, 1–16.

Garreaud, R. D.; Boisier, J. P.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H. H. and Veloso-Aguila, D., 2019. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective, *Int. J. Climatol*. 1–19, doi:10.1002/joc.6219

Gonzalez-Reyes, A. y Muñoz, A., 2013. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque* 34. 191–200. doi:10.4067/S0717-92002013000200008.

Holmes, R. L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, *Tree-ring Bull*, 43, 69–78.

Jönsson, P. and Eklundh, L., 2004. TIMESAT - A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Comput. Geosci.* 30. 833–845. doi:10.1016/j.cageo.2004.05.006.

Lara, A.; Soto, D.; Armesto, J.; Donoso, P.; Wernli, C.; Nahuelhual, L. y Squeo, F., 2003. *Componentes científicos clave para una política nacional sobre usos, servicios y conservación de los bosques nativos chilenos*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Iniciativa Científica Milenio de Mideplan. Available at: <http://www.forecos.net/libro/libroforecos.pdf>.

Lloret, F.; Keeling, E. and Sala, A., 2011. Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old Ponderosa Pine forests. *Oikos* 120, 1909–1920. doi:10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x.

Morales, M. S.; Cook, E. R.; Barichivich, J.; Christie, D. A.; Villalba, R.; Le Quesne, C. et al., 2020. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117. 16816–16823. doi:10.1073/pnas.2002411117.

Palmer, W. . (1965). Meteorological drought. Research Paper.

Rodríguez-Catón, M.; Villalba, R.; Srur, A. M. and Luckman, B., 2015. Long-term trends in radial growth associated with *Nothofagus pumilio* forest decline in Patagonia: Integrating local- into regional-scale patterns. *For. Ecol. Manage.* 339. 44–56. doi:10.1016/j.foreco. 2014.12.004.

Rojas, Y.; Muller-Using, S.; Martin, M. and Muller-Using, B., 2013. Rentabilidad económica de distintas propuestas silvícolas para los renovals de *Nothofagus* en el centro Sur de Chile, Informe Técnico 193, Valdivia, Chile.

Sánchez-Salguero, R.; Navarro-Cerrillo, R. M.; Swetnam, T. W. and Zavala, M. A., 2012. Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian Pine plantations. *For. Ecol. Manage.* 271. 158–169. doi:10.1016/j. foreco.2012.01.040.

Trenberth, K.; Jones, P. D.; Ambenje, P.; Bojariu, R.; Easterling, D.; Klein Tank, A. et al., 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press).

Urrutia-Jalabert, R.; Malhi, Y.; Barichivich, J.; Lara, A.; Delgado-Huertas, A.; Rodríguez, C. and Cuq, E., 2015. Increased water use efficiency but contrasting tree growth patterns in *Fitzroya cupressoides* forests of southern Chile during recent decades. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 120. 2505–2524. doi:10.1002/2015JG003098.

Venegas-González, A.; Juñent, F. R.; Gutiérrez, A. G. and Filho, M. T., 2018a. Recent radial growth decline in response to increased drought conditions in the northernmost *Nothofagus* populations from South America. *For. Ecol. Manage.* 409. 94–104, doi:10.1016/j. foreco. 2017.11.006.

Venegas-González, A.; Roig Juñent, F.; Gutierrez Ilabaca, A.; Peña Rojas, K. y Tomazello Filho, M., 2018b. Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central. *Bosque* 39. 81–93, doi:10.4067/S0717-92002018000100008.

Venegas-González, A.; Roig, F. A.; Peña-Rojas, K.; Hadad, M. A.; Aguilera-Betti, I. and Muñoz, A. A., 2019. Recent consequences of climate change have affected tree growth in distinct *Nothofagus macrocarpa* (DC.) FM Vaz & Rodr age classes in Central Chile, *Forests* 10, 1–17, doi:10.3390/f10080653.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1.

Villalba, R.; Lara, A.; Masiokas, M.; Urrutia, R.; Luckman, B.; Marshall, G. et al., 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nat. Geosci.* 5, 793–798. doi:10.1038/ngeo1613.

Zhu, Z.; Piao, S.; Myneni, R. B.; Huang, M.; Zeng, Z.; Canadell, J. and Ciais, P., 2016. Greening of the Earth and its drivers. *Nat. Clim. Chang.* 6. 791–795.

INSTITUTO FORESTAL



www.infor.cl