

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL





REVISTA CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL. INSTITUTO FORESTAL. CHILE

La revista Ciencia & Investigación Forestal es una publicación científico técnica, en español, publicada por el Instituto Forestal desde el año 1987. Es una publicación de acceso abierto, seriada, arbitrada, en formato digital y de carácter interdisciplinario.

En la Revista se divulga la investigación y ciencia forestal con una visión aplicada y orientada principalmente a profesionales y técnicos del sector forestal que demandan soluciones para sus problemas en el corto y mediano plazo, así como a profesionales del sector público y privado, investigadores, académicos, personeros con responsabilidad en la toma de decisiones técnico-políticas, y en general a la sociedad interesada en el conocimiento de los múltiples bienes y servicios que proveen los ecosistemas forestales.

Ciencia & Investigación Forestal publica contribuciones originales e inéditas de investigadores y profesionales, de instituciones nacionales o extranjeras, interesados en publicar investigación aplicada en el ámbito de las ciencias forestales y materias afines en las temáticas económicas, sociales y ambientales.

Todas las contribuciones presentadas a la revista son sometidas a un proceso de revisión por pares (*peer review*) bajo la modalidad de doble ciego.

La periodicidad de publicación es de tres números por año y ocasionalmente números especiales.

La Revista provee acceso libre a su contenido bajo el principio de hacer disponible la investigación al público para fomentar un mayor intercambio de conocimiento global. No existe costo por acceso a las contribuciones publicadas y los autores no asumen ningún costo por el procesamiento, revisión, edición y publicación de sus contribuciones.

En el sitio Web de la Revista (<https://revista.infor.cl>) es posible acceder a todos los números publicados y también encontrar toda la información referente a Equipo Editorial, Propiedad Intelectual, Declaración de Privacidad, Tipo de Contribuciones y la Guía y Recomendaciones para Autores. Se trata de una plataforma OJS (*Open Journal System*) en la cual, además de la información indicada, radica el manejo del flujo editorial de la Revista. Los autores deben a través de esta plataforma incorporar sus contribuciones, recibir posibles sugerencias de correcciones y finalmente enterarse de la aceptación o eventual rechazo de estas.

Santiago Barros & Braulio Gutiérrez
Editores C&I Forestal
sbarros@infor.cl bguetierr@infor.cl



CONTENIDO

ARTÍCULOS

- Aproximación a la distribución potencial de *Atriplex nummularia* Lindl. en la Región de La Araucanía, Chile.** 7
Manuel Vial A.
- Migración asistida de *Araucaria araucana*, un estudio de caso en Chile.** 21
Roberto Ipinza C.; Jorge González C.; María Molina B.; Braulio Gutiérrez C.; Hernán Soto G.; Laura Koch Z.; Rodrigo Hasbún Z.; Fernando Santibañez Q.; Lilian Saavedra P.; Carlos Magni D. & Juan Celhay S.
- Evaluación silvícola de bosques seminaturales de roble y pino oregón: Estudio de caso en una empresa agrícola-forestal de mediana propiedad en el centro-sur de Chile.** 33
Burkhard Müller-Using; Regina Petersen & Sabine Müller-Using.
- Crecimiento de lenga (*Nothofagus pumilio*) en un ensayo de progenies y procedencias de 22 años en la Reserva Nacional Coyhaique.** 47
Braulio Gutiérrez C.^{1*}, Hans Grosse W.², Iván Moya N.³, Jaime Salinas S.³; Bernardo Acuña A.³ & Exequiel Díaz V.
- APUNTES**
- Antecedentes de abastecimiento de biomasa con fines energéticos, el caso del pellet en Chile.** 57
Juan Pinilla S.; Karina Luengo V.; Mauricio Navarrete T. & Felipe Navarrete U.
- Huertos melíferos con especies forestales nativas: Una alternativa para apoyar la Agricultura Familiar Campesina y la rehabilitación del bosque nativo degradado en Chile.** 71
María Molina B.; Hernán Soto G.; Jorge González C.; Patricio Rojas V.; Laura Koch Z.; Braulio Gutiérrez C.; Roberto Ipinza C. & Patricio Chung G.



ARTÍCULO

Aproximación a la distribución potencial de *Atriplex nummularia* Lindl. en la Región de La Araucanía, Chile.

Manuel Vial Alarcón^{1*}.

¹INIA Carillanca, Chile. manuel.vial@inia.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.564>

Recibido: 07.07.2022; Aceptado 26.7.2022

RESUMEN

Las actuales condiciones climáticas y procesos provocados por el cambio climático obligan a indagar la posibilidad de establecimiento de nuevas especies en la Región de La Araucanía, particularmente en los sectores de secano. De aquí surge el interés por *Atriplex nummularia* Lindl. (Chenopodioideae) que es un arbusto perenne caracterizado por su elevada capacidad adaptativa y su uso multipropósito, principalmente como forraje en época de escasez y protección de suelos.

Se presentan resultados sobre capacidad de acogida y distribución potencial de la especie en La Araucanía (37° Lat S, Chile) a partir de la ejecución del programa Maxent, basado en el nicho ecológico y ubicación geográfica de la presencia de la especie, sumando variables climáticas (BIO) (1970-2000), valores cualitativos de calidad de suelo (SQ) y un modelo digital de elevación (MODELEV).

Se originó un mapa que estima la capacidad de acogida de la especie en la Región, donde los distritos agroclimáticos Angol y Chillan del secano interior dan la mejor acogida para el crecimiento y desarrollo de la especie; en menor grado los distritos agroclimáticos de Traiguén, Temuco y Concepción; por el contrario, la parte este del valle central, precordillera y cordillera andina son zonas con menor o nula capacidad de acogida. Estos resultados se deben considerar a nivel general, dado que por la escala de análisis pueden existir sectores o condiciones fisiográficas particulares que el modelo y mapa de salida no distinguieron.

Palabras clave: Secano interior, *Atriplex nummularia* Lindl., Región de La Araucanía, capacidad de acogida, nicho ecológico.

SUMMARY

The current climatic conditions and processes caused by climate change make it necessary to investigate the possibility of establishing new species in the La Araucanía Region, particularly in dryland sectors; given this, interest arises in *Atriplex nummularia* Lindl. (Chenopodioideae), a perennial shrub characterized by its high adaptive capacity and used for various purposes, mainly as fodder for livestock and soil protection.

Results about possible occupation and potential distribution of *the species* in La Araucanía (37°Lat S, Chile) is presented using Maxent software, which is based on the concept of ecological niche and geographical location of the presence of the species, adding climatic variables (BIO) (1970-2000), soil quality values (SQ) and a digital elevation model (MODELEV).

The analysis procedure produced an output map that allows us to approximate the possible occupation capacity of the species in the Region, where the macro zone of drylands and specifically the agro-climatic areas of Angol and Chillan provide the best conditions for the species to establish and develop; to a lesser degree the agro-climatic areas of Traiguén, Temuco and Concepción; on the other hand, the eastern part of the central valley, the low mountain range and the Andean mountain range are the areas with the least or no possible occupation capacity. These results should be considered at a general level given that, due to the scale of analysis, there may be particular sectors or physiographic conditions that the model and output map did not perceive.

Key words: Drylands, *Atriplex nummularia*, Araucanía region, possible occupation, ecological niche.

INTRODUCCIÓN

Características de la Especie

Atriplex nummularia Lindl. es una especie arbustiva perenne perteneciente a la familia de las quenopodiáceas; crece de forma erguida con una configuración basítona con hábito clasificado como nanofanerófita; presenta ramaje extendido y profuso, alcanzando entre 3 a 4 m; es nativa de Australia y actualmente con amplia distribución en varios países, principalmente en zonas áridas y semiáridas; se adapta a varios tipos de suelos, siendo reconocida por su condición de planta halófila, con alta tolerancia a suelos salinos y sódicos, desarrollándose además en suelos que no reúnen esa condición; en general, no crece en suelos excesivamente densos, compactados (atributos físicos desfavorables), o con problemas de anegamiento y mal drenaje, lo cual también ocurre con *A. semibaccata* (Saquella *et al.*, 1996; Ruiz y Parera, 2013).

Es una especie tolerante a la sequía, que se desarrolla en condiciones áridas y semiáridas, en un rango de pluviometría anual de entre 180 y 600 mm. Es una planta de fotosíntesis tipo C4, que crece activamente en temperaturas a partir de los 10-13°C (coincidente a parte de la primavera, verano y parte del otoño en clima mediterráneo) (Pham Thi *et al.*, 1982; Squella *et al.*, 1985). Las temperaturas medias para el crecimiento óptimo de la especie van entre los 30-35°C; temperaturas menores a 0°C provocan daños, teniendo como rango de tolerancia el comprendido entre los -8° y -12°C, bajo lo cual la planta debería morir; sin embargo, se ha informado de su sobrevivencia en localidades donde se registran temperaturas de entre -10 y -15°C (Otal y Correal, 2011; Falasca *et al.*, 2014). Autores señalan que la condición del suelo en el sitio-específico de plantación es de alta relevancia para el desarrollo de la planta, condicionando significativamente su desarrollo y productividad final en biomasa (Azócar *et al.*, 2007; Díaz *et al.*, 2020). Se ha utilizado como especie multipropósito (protección de suelos, abastecedora de material leñoso y forraje) en sistemas áridos y semiáridos; al respecto, se ha manejado como especie útil para el control de la erosión, conservación de suelos y combate a la desertificación (Le Houerou, 1992; Guevara *et al.*, 2005; Zucca *et al.*, 2013; Gacitúa-Ferrer, 2017).

La eficiencia del uso de la lluvia puede ser muy alta en condiciones casi óptimas de secano, llegando hasta 15-20 kg MS/ha por año y por mm de precipitación (Gintzburger *et al.*, 2000). Dada su elevada productividad de biomasa y persistencia, *Atriplex nummularia* Lindl. ha sido considerada como especie cultivable, principalmente de uso forrajero como recurso alimenticio estratégico durante el periodo seco (verano tardío y otoño), cuando no hay disponibilidad de forraje en praderas de ambientes semiáridos y climas mediterráneos secos; también puede suplir el suministro urgente de forraje en época primaveral o periodos de escasez por sequías catastróficas (Le Houérou, 1985); además se han observado efectos positivos sobre la tasa de crecimiento de la lana y peso corporal del ganado ovino bajo condiciones controladas; asimismo, es utilizado como suministro dietario complementario en raciones para cabras y ovinos, observándose un mejor aprovechamiento por el ganado caprino (Hyder, 1981; Abou El Nasr *et al.*, 1996; Norman *et al.*, 2004; Franklin-McEvoy *et al.*, 2007; Norman *et al.*, 2008; Ben Salem *et al.*, 2010; Askar *et al.*, 2016).

En Chile, el género *Atriplex* ha sido ampliamente utilizado para la recuperación de suelos, lucha contra la desertificación y uso como suplemento forrajero, concentrando plantaciones en la región de Coquimbo; siendo la principal especie *Atriplex nummularia* Lindl, pero además se encuentran las especies nativas como *Atriplex repanda* Phil. y *Atriplex desertícola* Phil.; el éxito del programa de forestación ha llevado a que al año 2016 existiesen 62.090 ha plantadas con *A. nummularia* (Meneses *et al.*, 2012; ODEPA, 2019).

Situación en el Secano Interior

Modelos de escenarios climáticos al año 2050 pronostican una severa modificación climática en el secano interior y valle central de la Región de La Araucanía (Latitud 37° Sur, Chile), cambiando de una condición húmeda a subhúmeda y de zonas subhúmedas a zonas semiáridas (AGRIMED, 2017). Indicadores como el Índice de aridez y Régimen de aridez apuntan a una mayor cantidad de meses secos y extensión continua de periodos bajo esa condición (Cuadro 1); al respecto, el indicador de

transición a condiciones semiáridas ha sido el Régimen de Aridez o Régimen Hídrico, usado además para establecer las zonas de riesgo de desertificación mediante la intensidad de la sequía estival en meses acumulados bajo el rango de $<0,5$ (UNESCO, 2010). Dicho escenario obliga a indagar la capacidad adaptativa de nuevas especies forrajeras o multipropósito para condiciones semiáridas.

Cuadro 1. Datos climáticos de estaciones ubicadas en el secano interior y clasificación del Régimen hídrico clasificado según la longitud del período con déficit de agua. $LP_D=N^\circ$ de meses secos = $P_m/ET_0 < 0,5$. Período 2018-2022.

Estación agrometeorológica ⁽¹⁾	Período interanual	N° meses secos continuos ($P_m/ET_0 < 0,5$)	Clasificación por Longitud de Estación Seca
El Vergel, Angol. 37°82'S; 72°66'O; 81 msnm.	2018-2019	7	Semiárido
	2019-2020	8	Semiárido
	2020-2021	8	Semiárido
	2021-2022	6	Subhúmedo
San Rafael, Los Sauces. 38°04'S; 72°43'O; 175 msnm.	2017-2018	4	Húmedo
	2018-2019	6	Subhúmedo
	2019-2020	8	Semiárido
	2020-2021	7	Semiárido
	2021-2022	7	Semiárido

(1) Red agrometeorológica de INIA. <https://agrometeorologia.cl/>

El objetivo del presente trabajo es formular una primera aproximación de la distribución potencial de adaptación de *Atriplex nummularia* en la Región de La Araucanía (Chile), mediante la aplicación de un modelo fundamentado en la ocupación natural georreferenciada, capacidad adaptativa de la especie y ocupación potencial de nicho ecológico de acogida.

MATERIAL Y METODO

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la Región de La Araucanía (31.842 km²), sin embargo, con el fin de congregarse datos referenciales aportados por las diversas fuentes utilizadas se consideró para análisis preliminar el mapa de Sudamérica (coordenadas EPSG:4326 - WGS 84) y luego recorte del espacio regional.

Presencia de la Especie

Los registros con presencia de numularia se obtuvieron desde bibliografía específica y base de datos disponibles en GBIF (Global Biodiversity Information Facility) correspondientes a las especies citadas: *Atriplex nummularia* Lindl., *Atriplex nummularia* Lindl. subsp. *nummularia*, *Atriplex nummularia* Lindl. subsp. *omissa* Aellen, *Atriplex nummularia* Lindl. subsp. *spathulata* Aellen.

Con tales registros se generó una base de datos de 3227 puntos georreferenciados utilizando el *plugin GBIF occurrences* en Qgis®. Con el fin de focalizar el análisis en las condiciones de Sudamérica, se consideró 57 puntos a los cuales se sumaron nuevas ubicaciones, considerando la presencia de la especie en parte de la Patagonia Argentina (Junín, Cuyo, Mendoza, Zapala-Neuquén, Camarones-Chubut), norte de Chile (Región Coquimbo principalmente) y sitios de seguimiento en la Región de La Araucanía, (Squella *et al.*, 1985; Ciano *et al.*, 2006; Meneses *et al.*, 2012) generando un archivo para proceso (*.csv). Los puntos de ubicación y polígonos fueron procesados con Qgis® 3.16.

Método de Simulación

Se utilizó el método de máxima entropía determinado por la salida del programa Maxent versión 3.2b (Phillips *et al.*, 2006). El modelo que ejecuta el software se basa en el concepto de ocupación del nicho ecológico, arrojando la distribución potencial de la especie, al analizar e integrar variables ecológico-bioclimáticas asociadas a poblaciones de la especie (presencia), determinando su desarrollo y tendencia a la colonización. El método permite encontrar áreas potenciales donde las especies aún no han habitado y que potencialmente pueden ocupar. Se ingresó los registros de la presencia de la especie (*.csv) delimitando el espacio de análisis y simulando una distribución de probabilidad de ocurrencia de presencia de la especie, o de capacidad de acogida, sobre la base de variables climáticas, edáficas y elevación.

Antes de la realización de las iteraciones con el programa Maxent, se ajustó las capas, dejando homologable cada pixel para el análisis; posteriormente se elevó la resolución de cada capa llegando a un pixel mínimo entre 735 m por 935 m, equivalente a 68,7 hectáreas por pixel de resolución asociado a la salida modelada.

En la salida de datos, Maxent aplica el test de Jackknife y AUC (Area Under the Curve), midiendo la importancia de cada variable en el desarrollo del modelo. El área bajo la curva (AUC) es un indicador efectivo del comportamiento del modelo (Manel *et al.*, 2001). Se considera adecuado si la línea de prueba se ubica cerca del tope superior izquierdo, dado que tiene mayor capacidad de predecir las presencias de la muestra de prueba. Usualmente se clasifica la confiabilidad del modelo en base a los valores de AUC con la siguiente escala: no confiable (AUC menor de 0,5); confiabilidad baja (0,5 a 0,7); aplicación útil del modelo (0,7 a 0,9); y confiabilidad alta del modelo (AUC mayor que 0,9).

Se consideró la salida logística, lo cual proporciona una estimación entre cero y uno de la probabilidad de presencia, asumiendo que el diseño del muestreo es tal que las típicas localizaciones tienen una probabilidad de presencia desde 0,5. A partir de los datos se realiza una clasificación para mejorar la visualización de la variabilidad de datos e interpretación a nivel visual y geográfico (Cuadro 2).

Cuadro 2: Codificación por Clasificación de rango en mapa de salida.

Clasificación	Rango de la salida logística (0-1)
0	0-0,1
1	0,1-0,25
2	0,25-0,5
3	0,5-0,75
4	0,75-1

Variables Climáticas

Las variables climáticas representan tendencias anuales (temperatura media anual, precipitación anual), estacionalidad (rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (temperatura del mes más frío y cálido, y precipitación de los meses más húmedo y cálido), entre otros. Las capas fueron obtenidas de la base de datos WorldClim¹ (Fick & Hijmans, 2017) versión 2.1 con datos entre 1970-2000, considerando 19 variables con el indicativo *BIO* bajo un recuadro de pixel en archivo ASCII (*.asc) (X: 2160 Y: 1080). La codificación y detalle se indican en el Cuadro 3.

¹ <https://www.worldclim.org/data/index.html>

Cuadro 3: Detalle de las variables climáticas consideradas para la confección del modelo.

Código	Detalles por indicador
BIO 1	Temperatura Media Anual
BIO 2	Intervalo medio diario (media mensual (t° máxima – t° mínima))
BIO 3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100).
BIO 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 7	Rango Anual de Temperatura (BIO5-BIO6)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 9	Temperatura Media del Cuarto Más Seco
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO 12	Precipitación Anual
BIO 13	Precipitación del mes más lluvioso
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la Precipitación (Coeficiente de Variación)
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del Trimestre Más Seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío

Variables Edáficas

Para la confección de las salidas del modelo se utilizó los parámetros del suelo proporcionados por HWSD² (Harmonized World Soil Database) (Fischer *et al.*, 2008; FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012), que considera siete cualidades del suelo importantes para la producción de cultivos, como: disponibilidad de nutrientes, capacidad de retención de nutrientes, condiciones de enraizamiento, disponibilidad de oxígeno para las raíces, exceso de sales, toxicidad y viabilidad de uso productivo.

Las cualidades del suelo están relacionadas con su viabilidad de uso agrícola, más específicamente, con los requisitos y tolerancias específicos de los cultivos. Cada pixel se origina en datos ASCII (*.asc) (X: 4320 Y: 2160). El indicativo de los aspectos de calidad de sitio y detalles se señalan en la Cuadro 4.

Cuadro 4: Detalle de las cualificaciones de indicadores de calidad de suelo (HWSD).

Indicativo e información aportada	Características del suelo
SQ1 Disponibilidad de nutrientes	Textura del suelo, carbono orgánico del suelo, pH del suelo, bases intercambiables totales.
SQ2 Capacidad de retención de nutrientes	Suelo Carbono orgánico, textura del suelo, saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico del suelo y de la fracción arcillosa.
SQ3 Condiciones de enraizamiento	Texturas del suelo, densidad aparente, fragmentos gruesos, propiedades vérticas del suelo y fases del suelo que afectan la penetración de las raíces y la profundidad y el volumen del suelo.
SQ4 Disponibilidad de oxígeno para las raíces.	Drenaje del suelo y fases del suelo que afectan el drenaje del suelo.
SQ5 Exceso de sales.	Salinidad del suelo, sodicidad del suelo y fases del suelo que influyen en las condiciones de sal.
SQ6 Toxicidad	Carbonato de calcio y presencia de yeso.
SQ7 Viabilidad para su utilización y facilidad mecánica de labranza	Textura del suelo, profundidad/volumen efectivo del suelo y fases del suelo que limitan el manejo del suelo (profundidad del suelo, afloramiento rocoso, pedregosidad, grava/concreciones y capas duras).

² <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>

Datos de Altitud (Modelo Digital de Elevación)

Como aporte a la confección del modelo se utilizó el archivo de elevación digital global (MODELEV) GTOPO30, generado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con un espacio de cuadrícula horizontal de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 kilómetro), y que tiene su origen en varias fuentes raster y vectoriales de información topográfica en mosaicos. Cada pixel se configura bajo un recuadro de archivo (*.asc) (X: 4800 Y: 6000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Salida Gráfica

La salida grafica (a) de la Figura 1, señala un valor AUC de 0,99; indicando una alta confiabilidad del modelo y amplia distribución de la especie con los datos que fundamentan el análisis. El grafico Jackknife (Figura 1, (b)) determinó que la variable de mayor importancia es BIO 18 (precipitación del trimestre más cálido), atribuyéndose el mayor contenido de información útil de manera aislada. La segunda variable con mayor ganancia es BIO 6 (temperatura mínima del mes más frío), mostrándose muy cercana de la variable B15 (estacionalidad de la Precipitación).

En relación a variables de calidad de suelo (SQ) se asocian aportes de SQ4 (disponibilidad de oxígeno para las raíces) y SQ 6 (toxicidad) en proporciones similares, contribuyendo ambos con información de influencia determinante para el proceso de arraigo de la especie. Asociado a lo anterior, el modelo de elevación (MODELEV) evidencia que la elevación es una variable que tiene elevada presencia en todos los aspectos de análisis, tanto de influencia por sí mismo, como en aspectos de constitutivos del modelo y su expresión geográfica.

El Cuadro 5 proporciona estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo de Maxent. En él se observa que 3 variables inciden sobre el modelo en un 83,5%, siendo la principal el modelo de elevación y luego la estacionalidad de las precipitaciones, seguida por la precipitación del trimestre más cálido.

Al agrupar por temáticas interpretadas como determinantes, que congregan las variables y su porcentaje de contribución (Cuadro 6) se obtiene que el suministro de agua y el momento en que se produce dicho abastecimiento (1) contribuye, junto con la topografía asociada con la altitud (2) en un 83,7%, seguido de las diferencias de temperatura y calidad de suelo (3, 4) con un 16,3%.

La determinante *Momento y suministro de agua* (1) concentra componentes como la estacionalidad de la precipitación y el suministro en el trimestre más cálido. Al respecto, el desarrollo de biomasa es funcional al suministro de agua que recibe la planta (Azocar *et al.*, 2007); en zonas desérticas (Negev, Israel), con pluviometría de 227 mm/año, se producen 3,2 t/MS/ha con una densidad de 10.000 plantas/ha y 0,9 t/MS/ha con una densidad de 625 plantas/ha (Benjamin *et al.*, 1995); en Australia Occidental (Yealering, Perth), con 362 mm/año logran producir 0,5 t/MS/ha con una densidad de rodal de 670 plantas/ha (Norman *et al.*, 2008). En contraste, Watson *et al.* (1987), bajo condiciones de riego (Safford, Arizona), obtuvo una producción de 12,7 t/MS/ha/año con una densidad de 17.078 plantas/ha.

En el norte de Chile (Lat. 31°, terrazas costeras) se registran producciones anuales altamente variables en función de la pluviometría, la condición de sitio y el régimen de pastoreo al cual ha sido sometida la plantación; en Los Vilos, con plantas de 30 meses, la producción fue de 0,21 t/MS/ha; en Agua Amarilla 0,57 t/MS/ha, Huentelauquén 0,785 t/MS/ha y Totoral 0,086 t/MS/ha; en la zona central (Llailay, Lat. 32°, valle central) la producción es de 0,228 t/MS/ha (Squella y Meneses, 1996); asimismo, la combinación de plantaciones con obras de conservación de suelos y captación de aguas lluvia favorecen el arraigo y desarrollo de las plantas de *Atriplex* en zonas áridas y semiáridas (Squella y Meneses, 1996; Gacitúa-Ferrer, 2017).

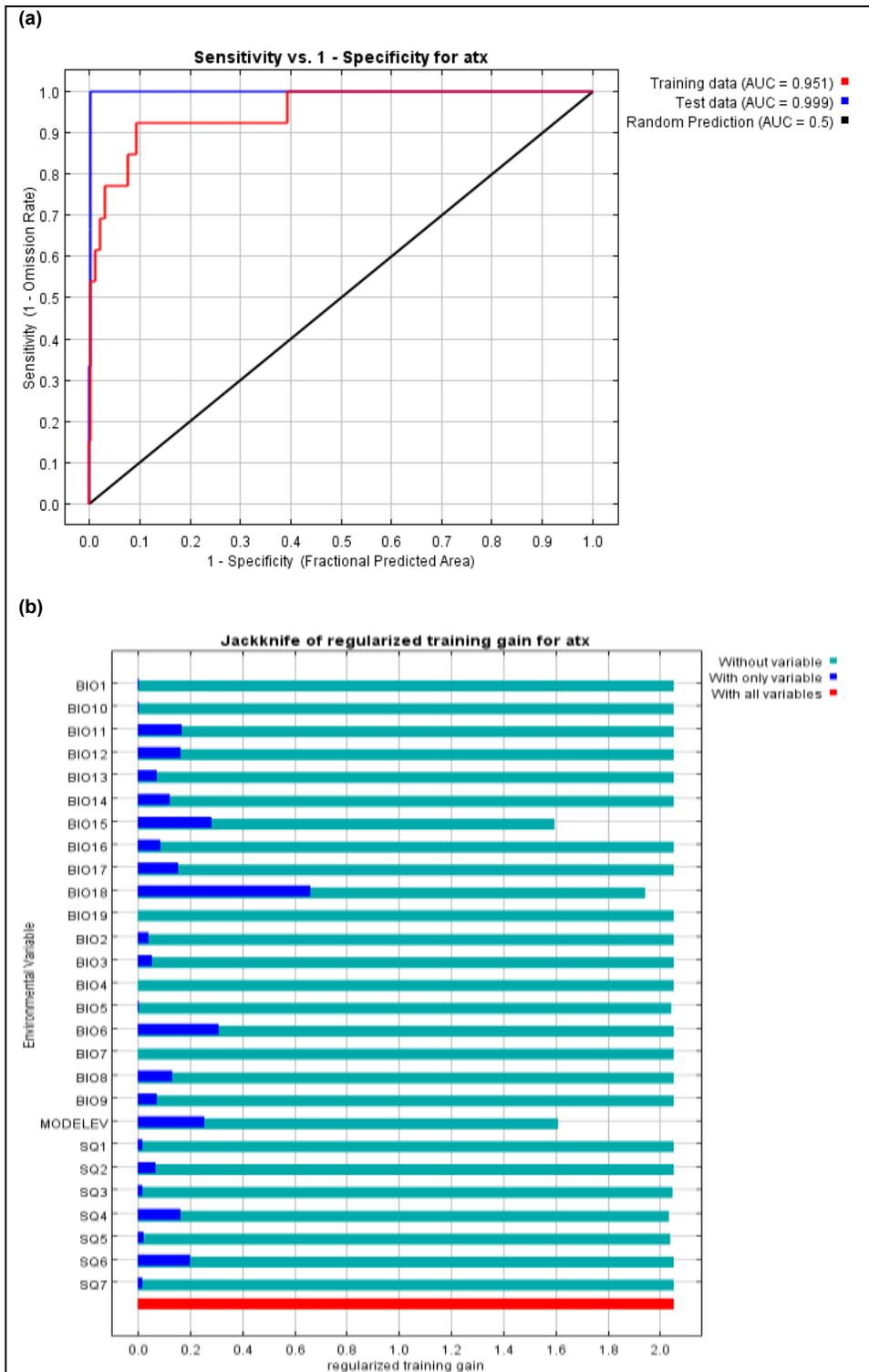


Figura 1: Salidas graficas (Maxent) resultante (a) AUC y (b) Jackkinfe.

Cuadro 5: Contribución porcentual de variables.

N°	Variable	Detalle	Porcentaje contribución	Importancia permutación
1	MODELEV	Modelo digital de elevación (DEM)	38,9	46,1
2	BIO15	Estacionalidad de la Precipitación (Coeficiente de Variación)	23,4	13,6
3	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido	21,2	26,9
4	BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	7,3	0
5	SQ6	Toxicidad (Carbonato de calcio y presencia de yeso)	4,4	1,5
6	SQ4	Disponibilidad de oxígeno para las raíces	1,9	2,6
7	SQ5	Exceso de sales	1	0,5
8	SQ1	Disponibilidad de nutrientes	0,5	0,2
9	BIO6	T° mínima del mes más frío	0,5	4,7
10	BIO5	T° máxima del mes más cálido	0,4	1,6
11	BIO13	Precipitación del mes más lluvioso	0,2	1,6
12	BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)	0,1	0
13	SQ3	Condiciones de enraizamiento	0,1	0,6
14	SQ2	Capacidad de retención de nutrientes	0,1	0

Cuadro 6: Agrupación de variables incidentes.

N°	Determinante	Variables consideradas	Contribución agrupada (%)
1	Momento y suministro de agua	BIO13, BIO15, BIO18	44,8
2	Topografía/Altitud	MODELEV	38,9
3	Temperatura	BIO3, BIO5, BIO6, BIO8	8,3
4	Calidad de suelo	SQ1, SQ2, SQ3, SQ4, SQ5, SQ6	8
Total			100

La determinante topografía y altitud (2) son factores que contribuyen relevantemente a la definición de la capacidad de acogida para la especie. Al respecto, [Valdés & Correa \(1993\)](#) señalan que los sectores planos y de pendiente moderada son más aptos para el establecimiento de la especie en IV Región de Chile que sectores con pendientes más pronunciadas; esta determinante, tiene relación con la profundidad de suelo para el arraigo radicular, condiciones texturales, pedregosidad y capacidad de retención de agua; asimismo, el régimen altitudinal está aparejado a condiciones climáticas incidentes con la altitud, principalmente temperatura ([FAO-Ecocrop, 1993-2007](#)).

La determinante de temperatura (3) se encuentra compuesta por isotermalidad y estabilidad térmica (temperaturas máximas en los meses más cálidos y medias y mínimas de los meses más fríos); al respecto, autores señalan mayores tasas de crecimiento en llanuras vecinas a los sectores costeros (secano costero y terrazas marinas de la IV Región de Chile) lo cual es atribuido a condiciones de oscilaciones térmicas benignas para la planta y el aporte constante de las neblinas costeras que mitigan el efecto de la aridez de la zona, esto a diferencia de los valles interiores donde el clima presenta menor humedad relativa y variaciones térmicas extremas ([Valdés & Correa, 1993](#); [Squella y Meneses, 1996](#); [Azocar et al., 2007](#)).

En relación a la calidad del suelo (Determinante 4), autores señalan que el factor edáfico establece el arraigo y persistencia de la especie en el sitio ([Azócar et al., 2007](#); [Díaz et al., 2020](#)); al respecto, [Valdés & Correa \(1993\)](#) señalan que el suelo (calidad de suelo) es un factor determinante si un sitio es apto para forestar o no con la especie, estableciendo que la variable edáfica explica el 75% de los rendimientos del

forraje; Lailhacar *et al.* (1991) establecen que la diferenciación en el desarrollo de arbustos adultos, en 27 sitios del norte de Chile, son atribuidas a variables edáficas, tanto químicas como físicas, considerando como aspectos negativos al elevado contenido de arcilla en los sitios y a la presencia de cloro.

Mapa de Salida

El mapa de salida (Figura 2) muestra la distribución de los rangos de clasificación propuestos en la Región de La Araucanía (salida Maxent (*.asc) 0 a 1, reclasificada). La información geográfica obtenida se relacionó con las zonas agroecológicas regionales (Rouanet, 1982; Rouanet *et al.*, 1988) y los distritos agroclimáticos presentes (AGRIMED, 2017) con los detalles climáticos de cada afinidad (Cuadro 7).

Cuadro 7: Distritos agroclimáticos y sus características dentro de la Clasificación 2 y 3 en la Región de La Araucanía.

Clasificación	Rango acogida	Distrito agroclimático	Zona agroecológica asociada	Detalle
4	0,75-1	Angol	Secano Interior	Templado cálido supraternal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb2Shs). Promedio de 231 días consecutivos libres de heladas. Temperaturas favorables a la actividad vegetativa duran 9 meses.
3-4	0,5-0,75 0,75-1	Chillan	Secano Interior	Templado cálido supraternal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb2Shs). Tiene un promedio de 211 días consecutivos libres de heladas. Temperaturas favorables a la actividad vegetativa duran 9 meses.
2-3	0,25-0,5 0,5-0,75	Temuco	Valle Central – Secano costero	Templado cálido mesotermal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb1Shs). Promedio de 205 días consecutivos libres de heladas. Temperaturas favorables a la actividad vegetativa duran 7 meses.
2-3	0,25-0,5 0,5-0,75	Traiguén	Secano Interior – Valle central	Templado cálido mesotermal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb1Shs) Promedio de 214 días consecutivos libres de heladas. Temperaturas favorables a la actividad vegetativa duran 7 meses.
2-3	0,25-0,5 0,5-0,75	Concepción	Secano Costero	Templado cálido supraternal con régimen de humedad sub húmedo seco (Csb2Shs). Promedio de 297 días consecutivos libres de heladas. Temperaturas favorables a la actividad vegetativa duran 9 meses.

Según la Figura 2, la Clasificación 4 (66.820 ha) presenta la mayor capacidad de acogida de la especie, siendo afin al área de influencia de los distritos agroclimáticos Angol y Chillán, predominantes en la zona norte de la región, y correspondientes a la configuración del Secano Interior.

El Secano Interior tiene mayor radiación solar anual, menor pluviometría a nivel regional, mayores temperaturas, menor incidencia de heladas (10 al año) y un periodo seco desde 5 a más meses; estas variaciones climáticas se originan, principalmente, por el efecto adiabático de la Cordillera de la Costa (sombra orográfica) que no permite el paso de nubosidad o carga húmeda hacia la vertiente oriental (Rouanet, 1982; Rouanet *et al.*, 1988; AGRIMED, 2017).

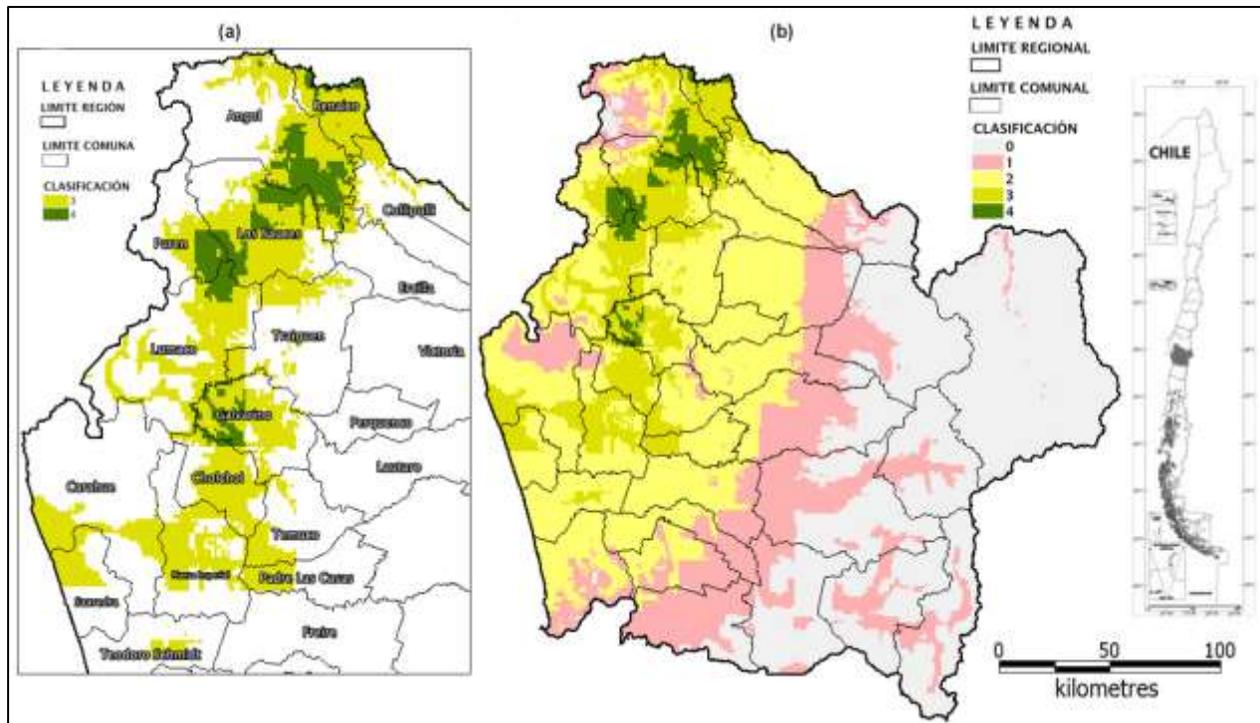


Figura 2: Mapas de salida de la Región de La Araucanía: (a) Clasificación 3 y 4 a nivel regional y detalles a nivel comunal. (b) Distribución regional potencial de *Atriplex nummularia* Lindl.

La Clasificación 3 (336.879 ha), corresponde al área de influencia en parte de los distritos agroclimáticos: Concepción, Temuco y Traiguén, que pertenecen a partes de las zonas agroecológicas del Secano Interior, Valle Central y Secano Costero (terrazas costeras), con alta variabilidad e influenciados, igualmente, por la presencia de la cordillera de la costa (Rouanet, 1982; Romero y Rojas, 1996; AGRIMED, 2017); al respecto, ambas clasificaciones (3 y 4), presentan las mejores condiciones de acogida para la especie, y en conjunto corresponden a un 13%, aproximadamente, de la superficie regional.

La Clasificación 2 cubre gran parte del Valle Central y el Secano Costero (distritos agroclimáticos Temuco y Concepción) con una superficie equivalente al 31% de la región (985.432 ha); el resto de la región (56%), corresponde a la Clasificación 0 (1.119.107 ha) y Clasificación 1 (675.992 ha), las cuales recaen en la parte este del valle central, la precordillera y cordillera andina, correspondiendo todas a zonas agroecológicas que presentan condiciones climáticas de mayor adversidad (bajas temperaturas, mayor incidencia de heladas, mayor nubosidad y nieve) y por ende no presentan entornos para la acogida de la especie, o son escasamente favorables para la misma.

Debido a la escala del análisis, tanto como el mapa de salida como la determinación de áreas son referenciales, pudiendo existir áreas o condiciones fisiográficas de menor escala con capacidad de acogida o ser nicho de colonización de la especie, y que el modelo no consideró o no son perceptibles en la salida geográfica.

CONCLUSIONES

- A partir de los datos recopilados y el modelo aplicado, la Región de La Araucanía corresponde al límite austral de la distribución y ocupación potencial de la especie *Atriplex nummularia* Lindl., sin excluir otras áreas a medida que se incrementen la calidad de los datos u otros antecedentes acerca de factores incidentes.

- El área geográfica con mejor capacidad de acogida corresponde al Secano Interior y donde se presentan las mayores extensiones de los distritos agroclimáticos Angol y Chillan en la Región; en menor capacidad se encuentran los distritos agroclimáticos Traiguén, Concepción y Temuco, en vecindad a la vertiente oriental y sur de la cordillera de la costa.
- El espacio considerado capacidad de acogida potencial de la especie es aproximado y altamente variable, basado en datos climáticos entre los años 1970-2000, por lo cual, dado el aumento de información climática en las últimas dos décadas, pueden existir variaciones no percibidas por el presente estudio.

REFERENCIAS

- Abou El Nasr H.M., Kandil H.M., El Kerdawy, Dawlat A., Khamis, H.S. & El-Shaer, H.M. (1997).** Value of processed saltbush and acacia shrubs as sheep fodders under the arid conditions of Egypt. *Small Ruminant Research*, 24(1): 15-20. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(96\)00932-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(96)00932-7)
- AGRIMED - Universidad de Chile. (2017).** Atlas Agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones del Biobío y la Araucanía. Universidad de Chile-FIA. Santiago. 136 p.
- Askar, A.R., Nassar, M.S., Badawy, H.S., Eid, E.Y., Guada, J.A. & Farid, M.F.A. (2016).** Recovered energy and efficiency of digestion in sheep and goats fed *Atriplex nummularia* compared to alfalfa hay. *Livestock Science*, 194, Pp: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.10.009>
- Azócar, P., Mansilla, A., Patón, D., Torres, C. & Santibáñez, F. (2007).** Estimación de la producción de forraje de *Nummularia (Atriplex nummularia)* Lindl según tamaño del arbusto y precipitación anual. *Avances de producción animal*. 32(1-2): 95-102.
- Benjamin, R.W., Lavie, Y., Forti, M., Barkai, D., Yonatan, R. & Hefetz, Y. (1995).** Annual regrowth and edible biomass of tow species of *Atriplex* and of *Cassia sturtii* after browsing. *J. Arid Environ.* 29, 63–84. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(95\)80065-4](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(95)80065-4)
- Ben Salem H., Norman H.C., Nefzaoui A., Mayberry D.E., Pearce K.L. & Revell D.K. (2010).** Potential use of oldman saltbush (*Atriplex nummularia* Lindl.) in sheep and goat feeding. *Small Ruminant Research*, Volume 91(1): 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.10.017>
- Ciano, N., Buono, G., Beider, A. & Zerrizuela, R. (2006).** Plantación de arbustos para uso múltiple y estratégico en sistemas ovinos de zonas áridas y semiáridas de Patagonia. Coyhaique: Serie Actas - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. N° 36. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8520>
- Díaz, R., Armando, R. & Guzmán, L.M. (2020).** Variación anual de la biomasa aérea de *Atriplex nummularia* Lindl. y aproximación a un modelo de estimación del forraje disponible. *Revista Tecnoárido Año 2 - N° 3. Estación experimental agropecuaria La Rioja. INTA Argentina. Capítulo 12.* 69 p.
- Falasca, S.L., Pizarro, M.J. & Mezher, R.N. (2014).** The agro-ecological suitability of *Atriplex nummularia* and *Atriplex halimus* for biomass production in Argentine saline drylands. *International Journal of Biometeorology*, 58(7): 1433-41. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0744-x>
- FAO-Ecocrop. (1993-2007).** *Atriplex nummularia*. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop-find-plant>
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. (2012).** Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, and IIASA, Luxemburg, Austria.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017).** World Clim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., van Velthuizen, H.T., Verelst, L. & Wiberg, D. (2008).** Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Luxemburg, Austria and FAO, Rome.
- Franklin-McEvoy, J., Bellotti, W.D. & Revell, D.K. (2007).** Supplementary feeding with grain improves the performance of sheep grazing saltbush (*Atriplex nummularia*) in autumn. *Aust. J. Exp. Agric.*, 47. Pp.: 912–917. <https://doi.org/10.1071/EA06149>
- Gacitúa-Ferrer, C. (2017).** Propiedades químicas de suelo en líneas de piedra con *Atriplex nummularia* Lindl. y aplicación de estiércol de caprino en una ladera degradada de la Región de Coquimbo. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera Agrónoma. Universidad de Chile. 343 p.

- Gintzburger, G., Bounejmate, M. & Nefzaoui, A. (2000).** Fodder Shrubs development in Arid and semi-Arid zones. En: Gintzburger, G., Bounejmate, M. & Nefzaoui, A. (Eds). Proceedings Hammamet Fodder Shrubs Workshop, 2 Vols. Publisher: International Center for Agricultural Research in the dry Areas (ICARDA) ISBN: 92-9217--097-0 and 92-9217-099-7. 300 p.
- Guevara, J.C., Allegretti, L.I., Paez, J.A., Estevez, O.R., Le Houérou, H.N. & Silva Colomer, J.H. (2005).** Yield, Nutritional Value, and Economic Benefits of *Atriplex nummularia* Lindl. Plantation in Marginal Dryland Areas for Conventional Forage Crops. *Arid Land Research and Management*, 19(4):327-340. <https://doi.org/10.1080/15324980500299672>
- Hyder, S.Z. (1981).** Preliminary observations on the performance of some exotic species of *Atriplex* in Saudi Arabia. *Journal of Range Management*, 34(3): 208-210. <https://doi.org/10.2307/3898042>
- Lailhacar, S., Carrasco, A. & Correa, C. (1991).** Variables edáficas a considerarse en la elección de terrenos para plantaciones con el arbusto forrajero *Atriplex nummularia* Lindl. II. Estación Experimental Agronómica Las Cardas. Universidad de Chile. *Avances en Producción Animal*, 16(1-2): 47-66.
- Le Houérou, H.N. (1985).** Forage and fuel plants in the arid zone of North Africa, the Near and Middle East. In: Wickens, G.E., Goodin, J.R. & Field, D.V. (Eds). *Plants for Arid Lands*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-6830-4_10
- Le Houérou, H.N. (1992).** The role of saltbushes (*Atriplex* spp) in arid land rehabilitation in the Mediterranean Basin: a review. *Agroforest Syst.*, 18. Pp: 107–148. <https://doi.org/10.1007/BF00115408>
- Manel, S. (2001).** Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *J. Appl. Ecol.* 38: 921-931. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00647.x>
- Meneses R., Varela, G., & Flores, H. (2012).** Evaluating the use of *Atriplex nummularia* Hay on Feed Intake, Growth, and Carcass Characteristics of Creole Kids. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(1): 74-79. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000100012>
- Norman, H.C., Friend, C., Masters, D.G., Rintoul, A.J., Dynes, R.A. & Williams, I.H. (2004).** Variation within and between two saltbush species in plant composition and subsequent selection by sheep. *Aust. J. Agric. Res.*, 55. Pp: 999–1007. <https://doi.org/10.1071/AR04031>
- Norman, H., Masters, D., Wilmot, M. & Rintoul, A. (2008).** Effect of supplementation with grain, hay or straw on the performance of weaner Merino sheep grazing old man (*Atriplex nummularia*) or river (*Atriplex amnicola*) saltbush. *Grass and Forage Science*, 63. Pp: 179-192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00623.x>
- ODEPA. (2019).** Panorama de la agricultura chilena. Chilean agriculture overview. 152 p. https://www.odepa.gob.cl/panorama_2019/2/
- Otal, J., & Correal, E. (2011).** Productividad primaria y aprovechamiento ovino de *Atriplex nummularia*, arbusto forrajero introducido en el S.E. Español. *Pastos*, [S.l.]. Pp: 283-293. Nov., 2011. ISSN 0210-1270. En: <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1640>
- Pham Thi, A., Pimentel, C. & Vieira Da Silva, J. (1982).** Effects of Water Stress on Photosynthesis and Photorespiration of *Atriplex nummularia*, a C4 plant. *Photosynthetica*, 16(3): 334-342.
- Phillips, S., Anderson, R. & Schapire, R. (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190. Pp: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Romero, O. & Rojas, C. (1996).** La pradera en el secano interior de la IX Región (Malleco-Cautín). Capítulo 31. En: *Praderas para Chile. Segunda Edición*. Pp: 563-578.
- Rouanet, J. (1982).** Aéreas agroecológicas determinantes del sistema de producción agropecuario. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca*, 1. Pp: 17-21.
- Rouanet J, Romero Y., O. & Demanet F., R. (1988).** Áreas agroecológicas en la 9 región: descripción. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca*. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/41361>
- Ruiz, M. & Parera, C. (2013).** Efecto del estrés hídrico y salino sobre la germinación de *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae) Effect of water and saline stress on germination of *Atriplex nummularia* (Chenopodiaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 18. Pp: 99-106.
- Squella, N.F. & Meneses, R. (1996).** Los arbustos forrajeros. Capítulo 7. En: *Praderas para Chile. Segunda Edición*. Pp: 563-578. Santiago.
- Squella N., Meneses, R. & Gutiérrez, V.T. (1985)** Evaluación de especies forrajeras arbustivas bajo condiciones de clima mediterráneo árido. *Agricultura Técnica*. En: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/38637>

- UNESCO. (2010).** Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Dentro del marco del proyecto "Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe". CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°25. En: https://www.cazalac.org/publico/fileadmin/templates/documentos/Atlas_de_Zonas_Aridas_de_ALC_Espanol.pdf
- Valdés, J. & Correa, J.C. (1993).** Determinación de calidades de sitio para plantaciones de *Atriplex nummularia* Lindl. en comunidades agrícolas de la comuna de Canela, IV Región. Ciencia & Investigación Forestal, 7(1): 49–83. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.180>
- Watson, M.C., O'Leary, J.W. & Glenn, E.P. (1987).** Evaluation of *Atriplex lentiformis* (Torr.) S. Wats. and *Atriplex nummularia* Lindl. as irrigated forage crops. J. Arid Environ., 13. Pp: 293-303. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)31119-4](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)31119-4)
- Zucca, C., Pulido-Fernández, M., Fava, F., Dessena, L. & Mulas, M. (2013).** Effects of restoration actions on soil and landscape functions: *Atriplex nummularia* L. plantations in Ouled Dlim (Central Morocco). Soil and Tillage Research, 133. Pp: 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.002>



ARTÍCULO

Migración Asistida de *Araucaria araucana*, un estudio de caso en Chile.

Roberto Ipinza Carmona^{1*}; Jorge González Campos²; María Molina Brand²; Braulio Gutiérrez Caro^{2*}; Hernán Soto Guevara²; Laura Koch Zúñiga²; Rodrigo Hasbún Zaror³; Fernando Santibáñez Quezada⁴; Lilian Saavedra Paillao⁴; Carlos Magni Díaz⁴; Juan Celhay Schoelermann⁵.

¹Instituto Forestal, sede Los Ríos. Roberto.ipinza@infor.cl

²Instituto Forestal, sede Biobío.

³Universidad de Concepción.

⁴ Universidad de Chile, Antumapu, Santiago.

⁵CMPC, Los Ángeles

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.566>

Recibido: 03.08.2022; Aceptado 19.08.2022

RESUMEN

La *Araucaria araucana* es una especie emblemática de los bosques de Chile y Argentina. En estos últimos años esta especie está siendo sometida a una fuerte presión de selección debida al cambio climático, el que ha predisuesto al daño foliar de la araucaria (DFA), enfermedad que está comprometiendo el 85% de las poblaciones chilenas, lo que ha cambiado su estado de conservación de vulnerable a en vías de extinción, en especial las procedencias de la cordillera de la costa. Dado este escenario se está ejecutando un programa de migración asistida de esta especie, para lo que se han seleccionado 450 madres a lo largo de su distribución natural, se han recogido semillas que se han viverizado manteniendo la estructura familiar. Mediante proyecciones climáticas para los próximos 50 y 70 años, se han seleccionado áreas de acogida, tanto fuera como dentro de la distribución natural. Se ha plantado a la fecha un total de 5 ensayos de progenie y procedencia. De las 450 familias se seleccionaron aproximadamente 100 para análisis genómico. La migración asistida permitirá que se exprese la variación genética adaptativa y de esta forma salvaguardar el potencial evolutivo de esta especie.

Palabras clave: *Araucaria araucana*, migración asistida, conservación.

SUMMARY

Araucaria araucana is an emblematic species of the forests of Chile and Argentina. In recent years, this species has been subjected to strong selection pressure due to climate change, which has predisposed it to Araucaria foliar damage (AFD), a disease that is compromising 85% of Chilean populations, which has changed its conservation status from vulnerable to endangered, especially those coming from the coastal mountain range. Given this scenario, an assisted migration program is being implemented for this species, for which 450 mothers have been selected throughout its natural distribution, and seeds have been collected and nursed, maintaining the family structure. Through climate projections for the next 50 and 70 years, host areas have been selected, both outside and within the natural distribution. A total of 5 progeny and provenance trials have been planted to date. Of the 450 families, approximately 100 were selected for genomic analysis. Assisted migration will allow adaptive genetic variation to be expressed and thus safeguard the evolutionary potential of this species.

Key words: *Araucaria araucana*, assisted migration, conservation

INTRODUCCIÓN

El artículo 1 de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, define al cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMCC diferencia así entre el cambio climático atribuible a fenómenos naturales y el que es alterado por las actividades humanas (IPCC, 2014).

Existe un temprano consenso científico sobre el papel del clima en la dirección de los patrones de distribución espacial y productividad de las plantas (Woodward, 1987). Las variables climáticas se relacionan con los rangos geográficos y ecológicos de distribución de las plantas, de acuerdo a las restricciones fisiológicas que éstas presentan y determinan la supervivencia y productividad de sus poblaciones en un determinado lugar (Villagrán & Hinojosa 1997; Harrison *et al.*, 2020). Sin embargo, lo alarmante es la tasa de cambios del clima durante las últimas décadas, que ha sido muy superior al ritmo de los siglos anteriores. Una variable clave, como la temperatura media global, ha presentado un aumento superior a 1°C durante el último siglo (IPCC, 2014). Los modelos de cambio climático global sugieren que la temperatura subiría en el orden de 2°C en la zona sur, incluso algo más en zonas montañosas de altura. Un cambio de esta magnitud puede ser bioclimáticamente significativo para muchas especies, considerando que en los últimos 10.000 años la temperatura no ha variado más que algunas décimas de grado. Se suma a este cambio, una modificación del régimen de lluvia, que está haciendo más secos y prolongados los veranos, lo que puede generar un efecto potenciador entre el estrés térmico y el hídrico a que estarían quedando sometidas las especies (Harrison *et al.*, 2020).

Si la tasa de cambios en el clima excede el ritmo de respuesta fisiológica de las especies, en especial la capacidad de las poblaciones de migrar o adaptarse, se puede esperar un profundo impacto adverso en la distribución de las especies, tanto la composición y estructuras de comunidades y así como en los procesos y funciones ecosistémicas asociados a estas especies (Ackerly *et al.*, 2010).

En el caso particular de Chile, se prevén cambios significativos en las décadas que vienen. El alza que ha venido teniendo la temperatura parece haberse acelerado a partir de los años 80, y particularmente, a partir de los años 2000³. La velocidad de estos cambios es muy superior a la velocidad con que las especies pueden reaccionar para generar una respuesta evolutiva en el corto plazo a estas nuevas condiciones bioclimáticas, sin precedentes.

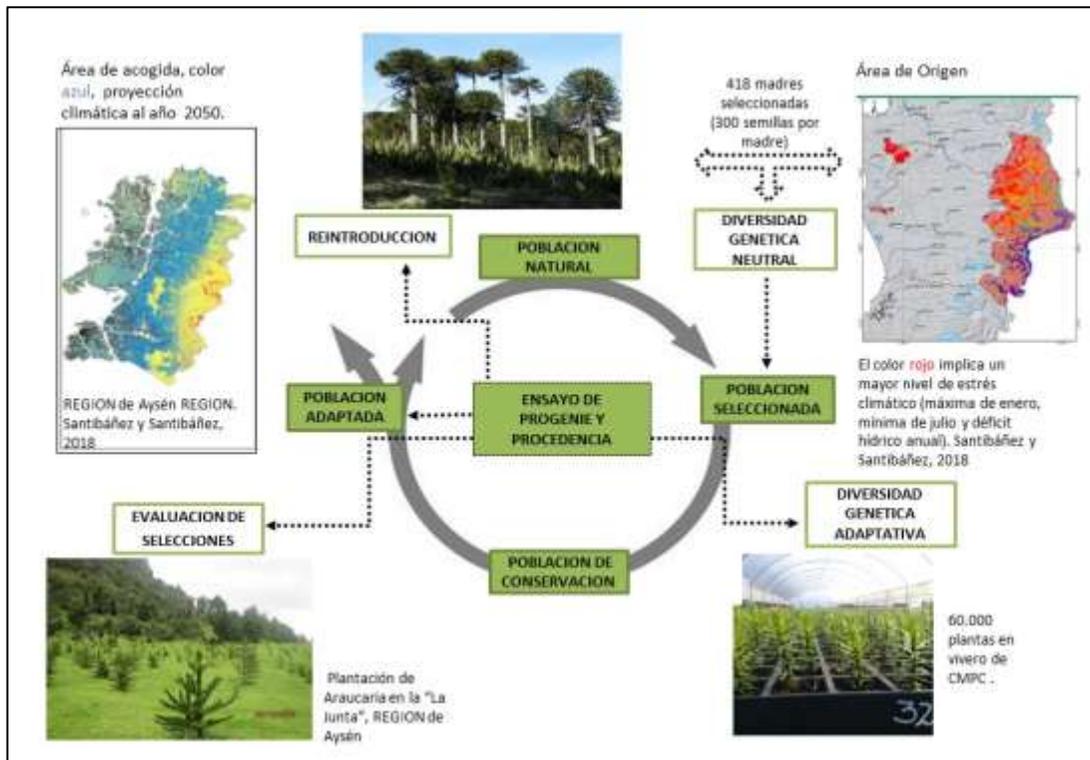
El cambio climático está afectando a muchas especies forestales en Chile, destacándose el caso de *Araucaria araucana*, donde a partir del año 2015 profesionales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) comenzaron a detectar muerte de ramas y presencia de canchales en ramas y tallos con abundante exudación de resina que abarcaban incluso a ejemplares completos de todas las edades en el 90% de las poblaciones naturales de la especie (Balocchi *et al.*, 2021). Tal fenómeno se denominó Daño Foliar de la *Araucaria* o DFA.

Cómo una respuesta inmediata al DFA se articuló una mesa técnica compuesta por doce organismos públicos, privados y académicos para aunar esfuerzos de investigación en torno a la sintomatología que afectaba a esta icónica especie de bosque nativo de Chile. Dentro del abanico de iniciativas que surgieron en dicha mesa técnica, y precisamente atendiendo a la posibilidad de sufrir una pérdida irreparable del acervo genético de la especie, debido a la mortalidad generada por el DFA, el Instituto Forestal (INFOR) determinó como prioritario iniciar acciones de conservación genética. Lo que se concretó a través de un proyecto GEF apoyado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Con financiamiento de este proyecto, denominado Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF), y con apoyo de la empresa privada a través de CMPC, se determinó aplicar el concepto de Migración Asistida,

La estrategia de Migración Asistida de *Araucaria*, establecida operacionalmente por Ipinza (2018), pretende salvaguardar el potencial evolutivo de la especie ante la presión del cambio climático. Se basa

³ <https://www.cr2.cl/>

en una colección de germoplasma que captura la máxima diversidad genética de la especie, y que posteriormente se establece en ensayos de progenies y procedencias, localizados dentro y fuera del área de distribución natural de la especie en Chile. De esta forma, la variación genética adaptativa de variables tales como la supervivencia y rasgos de crecimiento, entre otras, se expresen y permitirán seleccionar y utilizar el germoplasma de las araucarias sobreviviente de estos ensayos para restaurar y/o rehabilitar áreas afectadas por el cambio climático. Esta iniciativa tiene un doble objetivo, por una parte, rescatar material genético que pudiera perderse debido al efecto del daño foliar en la distribución natural de la especie, y por otra, establecer las bases de una población que permita efectuar en el futuro iniciativas de restauración con el material genético rescatado (Figura 1).



(Fuente: Ipinza, 2018)

Figura 1. Modelo de migración asistida de *Araucaria araucana*.

Como la mayoría de las especies leñosas, araucaria tiene una capacidad de dispersión relativamente limitada, y la presión del cambio climático sobrepasa esa capacidad. En consecuencia, no es sorprendente que la idea de migración asistida aparezca como una solución lógica y eficaz al problema de la adaptación, o más propiamente de la falta de adaptación, de los árboles ante el cambio climático (Aitken *et al.*, 2008). Adicionalmente, durante el 2018 – 2019 no habiendo certeza aún de las causas del DFA, ni de herramientas de prevención y menos aún de control, la Migración Asistida fue utilizada como un principio precautorio preciso para la conservación de esta significativa especie, no solo a nivel nacional, sino mundial (Ipinza, 2018).

En el presente documento se describe el plan o procedimiento operativo para la Migración Asistida de *Araucaria araucana*, siendo una de las primeras iniciativas de conservación de un recurso genético forestal a gran escala en Chile. Su objetivo es: Salvaguardar el potencial adaptativo de *Araucaria araucana*, ante la presión de selección del cambio climático mediante la aplicación de la estrategia de conservación conocida como Migración Asistida.

MATERIAL Y MÉTODO

Estudio Bioclimático

Para establecer el perfil bioclimático de la especie se sobrepuso su distribución geográfica (según el catastro de vegetación nativa de Chile) sobre una malla climática constituida por puntos de 1 km², en un Sistema de Información Geográfico (SIG). Cada uno de los puntos de esta malla se vincula a una base de datos donde se encuentra el valor de las variables climáticas; Calidez del verano (temperatura máxima del mes más cálido, enero), Rigor del invierno (temperatura mínima del mes más frío, julio) y Grado de aridez (déficit hídrico anual); se proyecta de acuerdo con estándares del IPCC, y se conforma un índice de estrés integral para el 2050 y 2070 (Santibáñez y Santibáñez, 2018).

A partir de la superposición de la distribución geográfica y la malla climática, se construyó un histograma de frecuencias de la presencia de la especie frente a intervalos de las variables climáticas. El supuesto básico es que la frecuencia más alta ocurre en los sectores donde la variable climática es más favorable, lo que implica menores niveles de estrés. Contrariamente, el intervalo máximo de distribución queda definido por las presencias de las especies en los menores y mayores valores de la variable analizada. Se supone que no hay individuos viviendo fuera de este intervalo máximo. Este análisis se repite para cada una de las variables climáticas, de modo que se obtienen 3 histogramas independientes, los que delimitan los rangos bioclimáticos tolerados por la especie (Santibáñez & Santibáñez, 2018).

Muestreo con Consideraciones Genéticas

En forma preliminar se utilizó como base la estructura genética reportada por Martín *et al.* (2014), quienes, utilizando 271 árboles desde 12 poblaciones naturales y aplicando 8 marcadores genéticos tipo microsatélites (SSR) e inferencia bayesiana, obtuvieron una estructura compuesta por cinco estratos genéticos; dos de ellos en la distribución costera y los otros tres en la distribución andina.

En la temporada verano-otoño del año 2018 se colectó aproximadamente 200 semillas por árbol, de un total de 418 árboles madre de *Araucaria araucana*, a partir de 12 poblaciones naturales representativas de los 5 estratos indicados. En verano de 2019 se realizó un enriquecimiento del muestreo de las poblaciones costeras, ocasión en que se colectó otras 200 semillas por árbol, para 40 árboles adicionales de la Cordillera de Nahuelbuta, por cuanto los resultados del estudio bioclimatológico sostienen que los mayores niveles de estrés estarían afectando precisamente a las poblaciones situadas en esa zona. En efecto, de acuerdo a antecedentes citados por Molina *et al.* (2021) los registros climatológicos indicarían que estas poblaciones son las que han soportado la mayor alza en la temperatura y/o variación en la pluviometría en los últimos 100 años.

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

Las semillas colectadas fueron trasladadas al Laboratorio de Semillas Forestales de la sede Biobío del Instituto Forestal, donde fueron almacenadas en cámara de frío a 4°C hasta su análisis. Se les midió parámetros morfológicos y fisiológico (González & Koch, 2021). Utilizando un pie de metro digital, se registró los valores promedio de 10 semillas por familia; Largo (LS), Ancho, para esta variable dada la forma oblonga a cuneiforme, se consideró el ancho medio (ASM) y ancho base de la semilla (ASB). Se registró también el peso individual (PS), y Número de semillas por kilo. Una vez sembradas en vivero, se evaluó la emergencia de plántulas y su supervivencia, así como parámetros morfológicos (altura y arquitectura de la planta), utilizando 10 individuos de cada familia de la colección (Saavedra, 2021).

Evaluación de Diversidad Genética Neutral

Se estimó la diversidad genética neutral de la colección muestreada, utilizando una muestra de 89 individuos, seleccionados según la distancia geográfica de las madres en terreno, a fin de minimizar el parentesco se utilizó un criterio del vecino más lejano dentro de cada población. Se emplearon marcadores moleculares del tipo Polimorfismo de nucleótido único (SNP), utilizando un genotipado por secuenciación (Elshire *et al.*, 2011). Este estudio se realizó en el Laboratorio de Epigenética Vegetal, de

la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción. La secuenciación se realizó mediante la prestación de servicios del Centro de Biotecnología de la Universidad de Wisconsin – Madison, Estados Unidos.

Se calculó la diversidad genética usando los índices de Heterocigocidad (H_e) y Coeficiente de Endogamia (G/S), un Análisis de Varianza Molecular (AMOVA) usando un modelo de alelos infinitos basados en FST, significancia estimada a partir de 499 permutaciones, y análisis de agrupamiento para estimar el número de clúster genéticos para las progenies de poblaciones de *Araucaria araucana*. Este análisis se realizó a través de dos métodos a) Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y b) agrupamiento *K-means*, el cual usa un criterio de información bayesiano (BIC, calculado usando la suma de cuadrados en lugar de verosimilitudes).

Viverización

La siembra de la colección de semillas y la producción de plantas se realizó en el vivero Carlos Douglas, de la empresa Forestal Mininco (CMPC), localizado en la ciudad de Yumbel, Región del Biobío, Chile. La siembra se realizó en contenedores de 110 cc de capacidad con corteza de pino compostada como sustrato, utilizando los esquemas operacionales de riego, fertilización y manejos culturales de las plantas del vivero. Durante la viverización, se registró y analizó la emergencia de plántulas (Gutiérrez, 2021).

Establecimiento de Ensayos Genéticos en Lugares de Acogida y No Acogida

La selección de sitios para el establecimiento de ensayos se realizó considerando las áreas de acogida proyectadas en los mapas generados en el estudio bioclimatológico antes mencionado. Las áreas de acogida pueden estar dentro o fuera del área de distribución natural de *Araucaria*, y se caracterizan por presentar un mínimo nivel (0,0-0,2) de estrés integral (Santibáñez & Santibáñez, 2018). En la selección de sitios para establecer los ensayos también se consideró, como elemento de comparación para determinar la interacción genotipo-ambiente, a algunas áreas con índice de estrés integral igual o superior a 21. Se realizaron visitas técnicas a cada sitio candidato, para revisar la superficie efectiva y factibilidad de instalación de un ensayo, una vez aprobado, se procedió a marcar la superficie del ensayo.

Establecimiento de Ensayos Genéticos

La mayoría de los ensayos se estableció con un diseño experimental de bloques incompletos, plantando un árbol por parcela (Single Tree Plot = STP). Este diseño permite evaluar muchas progenies o tratamientos, sin requerir bloques de gran tamaño, y por lo mismo de mayor heterogeneidad, como ocurre al usar bloques completos. El diseño de bloques incompletos balanceados, permite una configuración donde todas las comparaciones de las progenies se presentan un mismo número de veces en un bloque.

Para cada ensayo genético, se realizó una habilitación de terreno, consistente en corta de arbustos menores y roce de vegetación indeseada. Posteriormente se confeccionó casillas de 40 cm de diámetro x 40 cm de profundidad a un espaciamiento de 5x5 m, utilizando una pala plantadora tipo neozelandesa. Las plantas fueron establecidas en las casillas con un orden pre asignado de acuerdo al croquis del diseño del ensayo. Previo a la plantación, las raíces de las plantas fueron sumergidas en una solución fungicida (Ridomil Gold® (Syngenta), 460 mg/L), siguiendo el esquema para *Pino radiata* propuesto por Reglinski *et al.* (2008). Al momento de plantar, cada planta fue fertilizada con 15 g de Basacote® granular de 9 M (Compo Expert). Adicionalmente, se suplementó con 30 g de Boronato Calcita, para sustituir la baja proporción de Boro propia de los suelos de la Cordillera de Nahuelbuta, este se aplicó post-plantación, a 30 cm del cuello de cada planta.

Se planificó un programa de medición para los ensayos, contemplando una medición inicial al primer año para estimar la interacción genotipo-ambiente de las variables supervivencia y altura inicial, que son caracteres de alto valor adaptativo, el procedimiento de análisis se realiza de acuerdo con las sugerencias de Gilmour *et al.* (1999).

RESULTADOS

Estudio Bioclimático

La proyección climática dentro y fuera del área de distribución natural de la especie indica que el sur de Chile, fuera del área de distribución de araucaria, dispondrá de numerosas áreas de altura en la Cordillera de Los Andes, con índices mínimos de estrés integral, las cuales servirán como áreas de acogida para araucaria. Estas van bajando en altitud a medida que se avanza hacia el sur, de modo que, en Chiloé continental, las posibles zonas de acogida han descendido hasta los 1.500 msnm. Más al sur, en la Región de Aysén esta tendencia descendente se mantiene, cayendo claramente por debajo de los 1.000 msnm. Esta región presenta fuertes gradientes climáticos longitudinales, estos gradientes expresan un grado creciente de continentalidad de un clima con fuertes rasgos marítimos hasta un sector oriental fuertemente continental. El análisis muestra que el sector intermedio del territorio, en la parte continental mantendría niveles aceptables de estrés, razón que permite mirar a estas zonas como posibles áreas de acogida. Globalmente, en estas áreas las condiciones climáticas se mantendrían en rangos similares a lo que es en la actualidad el área de distribución de la *Araucaria araucana*.

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

La media, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros morfológicos evaluados en las semillas y plantas se muestran en los Cuadros 1 y 2, respectivamente. Letras distintas indican diferencias significativas usando un $\alpha = 0,05$.

Cuadro 1. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las semillas de *Araucaria araucana*, se muestra la media \pm desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando el test de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se muestra μ (media poblacional) \pm desviación estándar poblacional y Coeficiente de variación (CV%).

Poblaciones	Largo de Semillas (cm)	Ancho Medio Semillas (mm)	Ancho Basal de Semillas (mm)	Peso de Semillas (g)	N° de Semillas por Kilo**
Villa Las Araucarias	3,61 \pm 0,29c	1,24 \pm 0,08c	1,35 \pm 0,12abc	3,49 \pm 0,53 d	285
PN Nahuelbuta	4,11 \pm 0,36a	1,33 \pm 0,10a	1,36 \pm 0,11ab	3,95 \pm 0,64 bc	256
RN Ralco	3,83 \pm 0,35bc	1,22 \pm 0,11c	1,30 \pm 0,13cb	3,53 \pm 0,62 d	276
RN Las Nalcas	3,99 \pm 0,26ab	1,26 \pm 0,08bc	1,30 \pm 0,09cde	4,21 \pm 0,68 ab	227
Lonquimay	3,60 \pm 0,41c	1,24 \pm 0,08bc	1,24 \pm 0,07de	3,59 \pm 0,68 cd	292
RN Malalcahuello	3,80 \pm 0,40bc	1,21 \pm 0,10c	1,27 \pm 0,12cde	3,60 \pm 0,72 cd	276
RN Huerquehue	3,94 \pm 0,19ab	1,23 \pm 0,09bc	1,24 \pm 0,07de	4,06 \pm 0,54 abc	259
PN Conquillio	3,92 \pm 0,43ab	1,25 \pm 0,11bc	1,30 \pm 0,19bcd	4,00 \pm 0,89 abc	261
PN Villarica	4,08 \pm 0,40a	1,30 \pm 0,09ab	1,39 \pm 0,09a	4,39 \pm 0,63 a	239
Cruzaco	3,76 \pm 0,17bc	1,23 \pm 0,09bc	1,21 \pm 0,07e	3,83 \pm 0,63 bcd	254
Icalma	3,76 \pm 0,26bc	1,26 \pm 0,08abc	1,21 \pm 0,08e	3,90 \pm 0,69 bcd	249
Marimenuco	3,75 \pm 0,36bc	1,25 \pm 0,10bc	1,21 \pm 0,09de	3,82 \pm 0,45 bcd	274
$\mu \pm$ desviación estándar	3,90 \pm 0,36	1,26 \pm 0,10	1,29 \pm 0,12	3,87 \pm 0,71	Med: 257 *
CV (%)	9,36%	8,28%	9,31%	18,44%	26%

(*) Calculado sobre la mediana; (**) Test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 2. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las plantas de *Araucaria araucana*, se muestra la media \pm desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando pruebas de comparaciones múltiples de medias Bonferroni ($\alpha = 0.05$).

Poblaciones	Altura total (cm)	Altura hasta el verticilo (cm)	Presencia de ramas (%)	Largo de rama (cm)	Largo total (cm)	Supervivencia (%)**
PN Nahuelbuta	14,8 \pm 0,3abc	11 \pm 0,5a	95b	4,9 \pm 0,3c	22,4 \pm 0,6a	83,7 \pm 2,8ab
Villas Las Araucarias	15,6 \pm 0,3a	12,6 \pm 0,7b	78a	5,1 \pm 0,3c	22,7 \pm 0,8a	86,9 \pm 2,5abc
RN Ralco	14,1 \pm 0,1bcd	11,9 \pm 0,4ab	31abc	4,0 \pm 0,2a	16,2 \pm 0,3b	93,9 \pm 0,8c
RN Las Nalcas	13,6 \pm 0,2bd	11,7 \pm 0,5ab	38abc	4,5 \pm 0,2ab	16,9 \pm 0,5b	90,54 \pm 2,04ac
Lonquimay	13,1 \pm 0,39bcde	10,15 \pm 0,70ab	10ab	4,6 \pm 0,31a	14 \pm 0,67b	88,88 \pm 3,75abc
RN Malalcahuello	13,85 \pm 0,22bcd	11,9 \pm 0,53ab	40abc	4,2 \pm 0,26ab	16,7 \pm 0,52b	90,56 \pm 1,65abc
PN Conguillío	13,81 \pm 0,26bcd	11,8 \pm 0,53ab	33abc	4,1 \pm 0,20a	16,1 \pm 0,45b	90,48 \pm 1,41abc
Marimenuco	13,22 \pm 0,36bcde	10,07 \pm 1,16a	70abc	5 \pm 0,5bc	18,8 \pm 1,2ab	88,02 \pm 3,75abc
Cruzaco	14,98 \pm 0,35ac	11,7 \pm 0,86ab	44abc	4 \pm 0,4ab	17,6 \pm 0,6b	87,90 \pm 2,77abc
Icalma	13,24 \pm 0,18d	10,6 \pm 0,54a	42abc	4,27 \pm 0,2ab	16,5 \pm 0,4b	88,18 \pm 1,92ab
PN Huerquehue	13,19 \pm 0,23de	10,8 \pm 0,61a	40abc	4,8 \pm 0,3ab	16,8 \pm 0,6b	91,27 \pm 1,44abc
PN Villarrica	12,16 \pm 0,21e	10,5 \pm 0,50a	38abc	4,3 \pm 0,2ab	15,3 \pm 0,5b	83,63 \pm 1,66b
$\mu \pm$ desviación estándar	13.8 \pm 0.25	11.22 \pm 0.67	46.5	4.48 \pm 0.28	17.5 \pm 0.60	88.66 \pm 2.20

(**) Test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$).

Evaluación Diversidad Genética Neutral

La diversidad genética de la colección total fue $H_o = 0,15$. El coeficiente de endogamia, $Gis = 0,55$. Las poblaciones de la costa presentaron un $H_o = 0,34$ y $Gis = 0,58$, mientras que las poblaciones andinas presentaron un $H_o = 0,331$ y $Gis = 0,54$.

El análisis de varianza molecular (AMOVA) indica que la varianza se divide en 65% dentro de los individuos, 21,5% entre individuos, 12,5% entre poblaciones, y 0,6% entre cordilleras. Los resultados del ADFP y análisis K-means indican que la colección de progenies de *araucaria* está dividida en 5 grupos genéticos; 2 grupos bien definidos en la distribución costa (uno en la población del Parque Nacional Nahuelbuta y el otro en Villa Las Araucarias), en tanto que las poblaciones andinas se estructuran en 3 grupos genéticos.

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

El Número de semilla por kilogramo muestra una distribución asimétrica negativa, por lo que el estadígrafo más apropiado para describir los datos en ese caso es la mediana, la cual es de 257. No cumplen los supuestos de Normalidad y Homocedasticidad, por lo que para esta variable se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, que reemplaza al ANOVA ($\alpha = 0.05$). Las poblaciones presentan diferencias significativas entre ellas ($P = 0.00 < \alpha = 0.05$).

El largo promedio de las semillas (LS) para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $3,9 \pm 0,36$ cm. El análisis de varianza utilizando las poblaciones como factor, muestra que existen diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras, Parque Nacional Nahuelbuta y Villa Las Araucarias, presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Villa Las Araucarias son más pequeñas ($3,61 \pm 0,29$ cm) que las semillas de Parque Nacional Nahuelbuta ($4,19 \pm 0,36$ mm) (Cuadro 1). La variable LS de la población de la Reserva Nacional Ralco ($3,82 \pm 0,35$ cm) presenta diferencias significativas, con respecto a la población de Parque Nacional Villarrica ($4,08 \pm 0,40$ cm), lo que se explica debido a que ambas poblaciones corresponden a los extremos norte y sur respectivamente de la distribución andina (Cuadro 1).

El ancho medio de las semillas para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $1,26 \pm 0,10$ cm. Se encontró diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Parque Nacional Nahuelbuta ($1,33 \pm 0,10$ cm), son más anchas que las semillas de Villa Las Araucarias ($1,24 \pm 0,08$ mm) (Cuadro 1), resultados similares se observaron en el largo de la semilla, como se ha discutido, uno de los factores puede corresponder a la pérdida de diversidad genética. En las poblaciones andinas, las diferencias significativas se exhiben en

las poblaciones de los extremos de la distribución, en la distribución sur, Parque Nacional Villarrica presenta semillas levemente más anchas ($1,30 \pm 0,09$ cm) que las poblaciones más septentrionales Reserva Nacional Ralco ($1,22 \pm 0,11$ cm) y Reserva Nacional Malalcahuello ($1,21 \pm 0,10$ cm), manteniéndose la tendencia latitudinal (Cuadro 1).

Viverización

La emergencia promedio de plantas de la colección a los 7 meses post siembra, alcanzó a un 81,4% para las poblaciones andinas y 77,9% para poblaciones de la costa (Gutiérrez, 2019), lo que se traduce a 67.157 plantas de las cuales 60.158 corresponden a poblaciones andinas y 6.999 a las poblaciones costeras. La colecta de poblaciones costeras temporada 2019, genero un total de 5341 plantas quedando un total de 12.340 plantas.

Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

A la fecha se han seleccionado 5 sitios tanto dentro del área de acogida, como fuera de esta (Cuadro 3).

Cuadro 3. Sitios seleccionados para el establecimiento de ensayos genéticos dentro y fuera de las áreas de acogida.

Sitio Seleccionado	Propiedad	Superficie efectiva (ha)	Latitud	Longitud
Reserva Nacional Coyhaique	Pública	4,1	-45.51130	-71.98565
Predio Casa Blanca	Privada	1	-38.47411	-73.18093
Predio Caramávida	Privada	2,25	-37.65783	-73.24658
Reserva Nacional Malalcahuello	Pública	40	-38.39926	-71.59341
Predio San Antonio	Privada	1,6	-37.79468	-72.82972

Evaluación de Diversidad Genética Adaptativa

La medición del ensayo establecido en la Reserva Nacional de Coyhaique, a dos años de su plantación, permitió estimar la heredabilidad individual de la altura, como $h^2 = 0,50 \pm 0,13$ y de la supervivencia como $h^2 = 0,16 \pm 0,18$.

DISCUSIÓN

Estudio Bioclimático

Existe solo un trabajo de predicción de áreas potenciales de distribución de araucaria, realizado por el Centro de Semillas, Genética y Entomología de CONAF en el año 2018, usando el método de Máxima Entropía (Phillips *et al.*, 2006). Los resultados de este estudio sostienen que la probabilidad futura de presencia de araucaria ocupara un área más allá de su distribución geográfica natural, principalmente en la Cordillera de Los Andes entre las regiones de Maule y Aysén. En Aysén se fortalece la probabilidad de presencia de araucaria en una mayor superficie (Espinoza, 2018), siendo resultados similares a los encontrados en el estudio bioclimatológico presentado en este trabajo.

Evaluación Diversidad Genética Neutral

La heterocigocidad es levemente menor en poblaciones costeras ($H_o = 0,14$) que en poblaciones andinas ($H_o = 0,15$), mientras que el índice GIS es mayor en poblaciones costeras (GIS=0,58) que en las andinas (GIS=0,54). Esta situación se podría correlacionar con el estado de amenaza en que se encuentran las poblaciones costeras. Para este estudio, el valor general de GIS =0,55 da indicios sobre el cruzamiento histórico entre individuos. Las poblaciones andinas del centro de la distribución natural presentan

menores valores de H_o , lo cual podría estar relacionado con la especialización de dichos individuos a un hábitat de mayor altura y por ende clima más frío.

El análisis jerárquico de diferenciación genómica dentro de individuos, entre individuos (dentro de las poblaciones), entre poblaciones (dentro de las cordilleras) y entre macrozona muestra que el mayor porcentaje de la variación está dentro de los individuos. No obstante, existe diferenciación significativa en los otros niveles jerárquicos.

Por otra parte, los resultados del ADCP y análisis *K-means* indican que la colección de progenies de araucaria está estructurada en 5 grupos genéticos compuesto por los individuos pertenecientes a las poblaciones costeras separados por el PC1, por otro lado, del PC2 se encuentran las poblaciones andinas. Los resultados obtenidos respaldan la estructura genética reportada [Martín et al. \(2014\)](#).

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

En la literatura se reporta un número estimado de 260 semillas por kilo ([Muñoz, 1984](#); [Caro, 1995](#); [González et al., 2006](#)). [Troncoso \(2015\)](#), informa un valor de 311 ± 19.10 semillas/ kg (año 2013) y $406 \pm 12,00$ semillas/kg (año 2014), para la población de Villa Las Araucarias. En este estudio, para esta localidad, se obtuvo un valor 294 ± 63.37 semillas/kg.

En las poblaciones andinas, el número de semillas por kilogramo varía de 180 a 250, siendo también un número mucho menor que en Villa Las Araucarias. La diferenciación en el tamaño de las semillas está correlacionada con numerosos factores ambientales, como la variación altitudinal ([Bekessy, 2002](#)), la que implica variaciones de temperatura, cantidad y tipo de precipitaciones (pluviales o nivales). Las diferencias ambientales podrían explicar las diferencias en el tamaño de las semillas de araucaria.

En relación al largo de semillas (LS), en los últimos años varios autores informan una disminución en la variabilidad genética para la especie en la población de Villa Las Araucarias. Los análisis utilizando marcadores moleculares tipo microsatélites (SSR), muestran que la población de Villa Las Araucarias presenta la menor variación genética con respecto al resto de las poblaciones de la especie, medida como heterocigosidad no sesgada ($U_{He} = 0.56$) ([Martín et al., 2014](#)). Otros autores, utilizando marcadores tipo aloenzimas, señalan que Villa Las Araucarias tiene el menor número de alelos por locus polimórfico. Se puede teorizar que la falta de diversidad genética tendrá efectos en la expresión de rasgos morfológicos, sin embargo, se necesita profundizar estos análisis.

Se puede comparar los datos de la variable LS para la localidad Villa Las Araucarias; [Troncoso \(2015\)](#), determinó que las semillas colectadas en 2013 en esta localidad miden $3,84 \pm 0,28$ cm, en el presente estudio esta localidad presenta un valor de $3,61 \pm 0,29$ cm, siendo valores similares. Otros autores mencionan valores de 4 a 5 cm para el largo de las semillas a lo largo de su distribución natural ([Donoso & Cabello, 1977](#); [Donoso, 1998](#)). Aun sin pruebas estadística, se puede teorizar que las semillas han disminuido su tamaño, sin embargo, para confirmar estas suposiciones se debe contar con información temporal sobre la variable.

El comportamiento de la variable LS en las distribuciones extremas, sugiere una tendencia latitudinal en la variación, por lo menos en la macrozona Andes. Al respecto, [Sersic et al. \(2011\)](#), describen quiebres filogeográficos latitudinales para algunas especies de los generos *Nothofagus* y *Austrocedrus*, lo que podría estar explicando estas diferencias en araucaria.

[Troncoso \(2015\)](#), reporto un valor de $13,9 \pm 1,2$ mm de ancho medio de la semilla, para la localidad Villa Las Araucarias, en este estudio para esta localidad se reporta un valor de $12,43 \pm 0.83$ mm de ancho medio de la semilla. Al igual que con el largo de las semillas, el ancho también parece disminuir, aunque cabe destacar la baja diversidad genética de la localidad reportada.

Viverización

Una evaluación preliminar de emergencia de plántulas, se realizó en octubre de 2018, es decir a 4 meses post plantación, alcanzando un valor medio de 58,9%. En esa ocasión se observó que en las procedencias costeras la germinación y la emergencia de plántulas (68,1 %) se manifiestan antes que en las procedencias andinas (57,8%). En la evaluación final, efectuada 7 meses post siembra, es decir en enero de 2019, se constató un aumento general de la emergencia de plántulas, que subió de 58,9 a 81,1%. Este incremento fue de mayor envergadura para las procedencias andinas, las cuales, a pesar de exhibir una germinación más lenta, alcanzaron valores de emergencia de plántulas superiores a los de las procedencias costeras. Considerando la evaluación de enero 2019, en promedio la emergencia de plantas de las 418 familias alcanzó un 81%, siendo mayor en las semillas de las procedencias andinas (81,4%) que en las procedencias costeras (77,9%) (Gutiérrez, 2021).

Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

Se han establecido 5 ensayos genéticos, de progenie y procedencias, todo de tamaños diferentes debido a la superficie efectiva, pero usando el mismo esquema operacional. Esta red de ensayos permitirá generar un resguardo del material vegetal, y subyacentemente de la diversidad genética de la especie.

La reintroducción en poblaciones naturales de germoplasma resguardado en los ensayos genéticos se llevará a cabo cuando se verifiquen las correlaciones genéticas edad-edad, desempeño de las procedencias en las distintas áreas de ensayo, interacciones genotipo ambiente y puesta a punto de tecnología de embriogénesis somática, entre otros detalles.

CONCLUSIONES

Dentro del programa de migración asistida, el establecimiento de ensayos de progenie y procedencia de *Araucaria araucana*, tanto fuera como dentro de la distribución natural de esta especie, está permitiendo salvaguardar su potencial adaptativo, en especial las procedencias de las zonas costeras que se encuentran en peligro de extinción por la presión de selección que está ejerciendo el cambio climático.

El estudio bioclimático permitió identificar las zonas de máximo y mínimo estrés integral, denominándose esta última como área de acogida para la migración asistida de la *Araucaria araucana*.

El análisis molecular de *Araucaria araucana* reveló que la heterocigosidad de las procedencias costera es levemente menor a las andinas, y la endogamia es mayor en las procedencias costeras que las andinas.

El Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y el agrupamiento *K-means*, determinó la existencia de 5 agrupaciones ecológico genético de la *Araucaria* en la zona de estudio, dos costeras y tres andinas.

La procedencia costera de Villa Las Araucaria, presenta los menores tamaños de semilla y menores niveles de diversidad genética y es donde el efecto de la presión del cambio climático se está expresando con mayor intensidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Corporación Nacional Forestal, en especial a sus profesionales Aida Baldini, Monica Gonzalez, Julio Figueroa, Neftali Soto y Leonardo Araya. Al Dr. Fernando Drake (QEDP) de la Universidad de Concepción, por su empuje y compromiso para aunar a muchas instituciones en la tarea de salvaguardar el potencial evolutivo de la *Araucaria araucana*. Al señor Eduardo Cayul, presidente de los Loncos de la comunidad de Lonquimay. A las empresas forestales: APROBOSQUE AG., CMPC y Bosque Arauco, entre otras por su apoyo. Por último, a todos los administradores y guarda parques del

Sistema Nacional de Áreas Silvestre Protegidas con presencia de *Araucaria* de la Corporación Nacional Forestal.

REFERENCIAS

- Aitken, S., Yeaman, S., Holliday, J., Wang, T. & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcome for tree population. *Evol. Appl.*, N° 1. Pp: 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Ackerly, D., Loarie, S., Cornwell, W., Weiss, S., Hamilton, H., Branciforte, R. & Kraft, N. (2010). The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Divers. Distrib.*, N° 16. Pp: 476-487. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00654.x>
- Balocchi, F., Wingfield, M.J., Ahumada, R. & Barnes, I. (2021). *Pewenomyces kutranfy* gen. nov. et sp. nov. causal agent of an important canker disease on *Araucaria araucana* in Chile. *Plant Pathol.*, N° 70. Pp: 1243-1259. <https://doi.org/10.1111/ppa.13353>
- Bekessy, S., Allnutt, T., Premoli, A., Lara, A., Ennos, R., Burgman, M., Cortes, M. & Newton, A. (2002). Genetic variation in the vulnerable and endemic Monkey Puzzle tree, detected using RAPDs. *Heredity*, N° 88. Pp: 243-249. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800033>
- Caro, M. (1995). Producción y dispersión de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch., en Lonquimay. Memoria para obtener el título de Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. 55 p.
- Donoso, C. & Cabello, A. (1977). Antecedentes fenológicos y de germinación de especies leñosas chilenas. *Revista de la Facultad de Ciencias Forestales*, 1(2): 31-41.
- Donoso, C. (1998). Bosques templados de Chile y Argentina, Variación, estructura y dinámica. Cuarta Edición. Editorial Universitaria. Santiago. 483 p.
- Elshire, R., Glaubitz, J., Sun, Q., Poland, J., Kawamoto, K., Buckler, E. & Mitchell, S. (2011). A Robust, Simple Genotyping-by-Sequencing (GBS) Approach for High Diversity Species. *PLoS ONE*, N° 6: e19379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019379>
- Espinoza, J. (2018). Modelamiento del nicho ecológico y estimación del efecto del cambio climático en la distribución de especies. Centro de Semillas, Genética y Entomología, CONAF, Chillán, Chile.
- Harrison, S., Spasojevic, M. & Li, D. (2020). Climate and plant community diversity in space and time. *PNAS*, N° 117. Pp: 4464-4470. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921724117>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. En: R.K. Pachauri, R.K. & Meyer, L.A. (Eds). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland. 151 p.
- Ipinza, R. (2018). Migración Asistida: El nuevo paradigma de la conservación en recursos genéticos forestales para la adaptación al cambio climático. *Ciencia & Investigación Forestal*, 24(3): 69-88. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2018.504>
- Gilmour, A., Cullis, B., Welham, S. & Thompson, R. (1999). ASREML. Beta Version. 177 p.
- González, M., Cortés, M., Izquierdo, F., Gallo, L., Echeverría, C., Bekkesy, S. & Montaldo, P. (2006). *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch Araucaria (ó), Pehuen, Piñonero, Pino Araucaria, Pino chileno, Pino del Neuquén, Monkey puzzle tree. En: Donoso, C. (Ed.) Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia, Chile. Pp: 36-53.
- González-Campos, J. & Koch, L. (2021). Evaluación de parámetros morfológicos y fisiológicos en semillas de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch, Cosecha Temporada 2018. En: Ipinza, R. & Müller-Using, S. (Eds). Migración asistida de *Araucaria araucana*. FAO y MINAGRI. Santiago. Pp: 75-89.
- Gutiérrez, B. (2019). Análisis de la emergencia de plántulas durante la viverización de una colección de semillas de 418 familias de *Araucaria araucana*. *Ciencia & Investigación Forestal*, 25(1): 21-38. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.508>
- Martín, M., Mattioni, C., Lusini, I., Molina, J., Cherubini, M., Drake, F., Herrera, M. et al. (2014). New insights into the genetic structure of *Araucaria araucana* forests based on molecular and historic evidences. *Tree Genet. Genomes*, N° 10. Pp: 839-851. <https://doi.org/10.1007/s11295-014-0725-1>

- Molina, M., González, J., Soto, H. & Barrientos, M. (2021).** Cosecha de semillas de *Araucaria araucana*. En: Ipinza, R. & Müller-Using, S. (Eds). Migración asistida de *Araucaria araucana*. FAO y MINAGRI. Santiago. Pp: 27-52.
- Muñoz, R. (1984).** Análisis de la productividad de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch, en el área de Lonquimay. Tesis para obtener el título de ingeniero forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. 84 p.
- Phillips, S., Anderson, R. & Schapire, R. (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Modell*, N° 190. Pp: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Reglinski, T., Spiers, T., Taylor, J., Ah Chee, A. & Dick, M. (2008).** Management of Phytophthora root rot in radiata pine seedlings. *Plant Pathology*, 58(4): 723-730. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02021.x>
- Saavedra, L. (2021).** Análisis morfológico y genético de caracteres tempranos en plantas de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch, en un ensayo de progenie en vivero. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza Universidad de Chile. Santiago. 65 p.
- Santibáñez, F. & Santibáñez, P. (2018).** Evaluación de las forzantes bioclimáticas en la sustentabilidad de las comunidades de araucarias en Chile. Hacia una estrategia de conservación del patrimonio natural frente a la amenaza del cambio climático. Informe Técnico INFODEP. Santiago.
- Sersic, A., Cosacov, A., Cocucci, A., Johnson, L., Pozner, R., Avila, L., Sites, J., Morando, M. (2011).** Emerging phylogeographical patterns of plants and terrestrial vertebrates from Patagonia. *Biol. J. Linn. Soc.*, N° 103. Pp: 475-494. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2011.01656.x>
- Troncoso, A. (2015).** Evaluación del proceso de germinación de la especie *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. proveniente del sitio prioritario de conservación de Villa Las Araucarias, Región de La Araucanía. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 40 p.
- Villagrán, C. & Hinojosa, L. (1997).** Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: Análisis fitogeográfico. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, N° 70. Pp: 241-267.
- Woodward, F. (1987).** *Climate & Plant Distribution*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press. UK. 174 p.



ARTÍCULO

Evaluación silvícola de bosques seminaturales de roble y pino oregón: Estudio de caso en una empresa agrícola-forestal de mediana propiedad en el centro-sur de Chile.

Burkhard Müller-Using^{1*}; Regina Petersen²; Sabine Müller-Using³

Ing. Forestal, Dr. Forest. Renovales Müller-Using Ltda., Panguipulli. burkhardmusing@yahoo.de

Ing. Forestal, Dr. Forest. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen. Petersen.regina@t-online.de

Ing. Forestal, Dr. Forest. Instituto Forestal, Sede Los Ríos. Valdivia. Chile. smuller@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.563>

Recibido: 08.07.2022; Aceptado 16.08.2022

RESUMEN

Se efectuó un estudio sobre la compatibilidad silvícola de las especies *Nothofagus obliqua* (roble) y *Pseudotsuga menziesii* (pino oregón) en bosques mixtos de dos estratos, específicamente rodales de roble que en estado de latizal y fustal fueron enriquecidos con pino oregón. Para ello se midió las condiciones de luminosidad en el estrato inferior de 3 fustales de pino oregón de 5-8 años de edad con distintas densidades, y se relacionó la luz relativa expresada como ISF (Indirect Site Factor) con parámetros de crecimiento en ambos estratos. Dependiendo de las condiciones de luz, se observó incrementos anuales en altura de 51 y 108 cm/año. Adicionalmente, se analizó el crecimiento en un rodal, donde el pino oregón ya tenía 26 años. En este caso la altura total los árboles de pino oregón estaba todavía lejos de la altura del estrato de los robles por lo que no ha habido competencia de copas entre las dos especies, ni tampoco se proyecta que la haya dentro de los próximos 20 años. Sin embargo, a nivel de rodal el área basal de pino oregón ya supera a la de roble, lo que indicaría la existencia de competencia por agua y/o nutrientes entre ambas especies. Esta competencia se podría reducir mediante un raleo fuerte del estrato de pino oregón, teniendo los cuidados pertinentes para no dañar el roble remanente. El seguimiento en el manejo de esta mezcla, incluyendo la corta final, debe basarse en el propósito del rodal futuro y en un análisis económico.

Palabras claves: *Nothofagus obliqua*, *Pseudotsuga menziesii*, bosques mixtos, plantación suplementaria

SUMMARY

A study was carried out on the silvicultural compatibility of *Nothofagus obliqua* (roble) and *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) in mixed forests of two strata, specifically middle-old *Nothofagus obliqua* stands that were enriched with *Pseudotsuga menziesii*. For this purpose, light conditions were measured in the lower stratum of 5-8 year old Douglas fir in 3 stands of different densities and the relative light expressed as ISF (Indirect Site Factor) was related to growth parameters in both strata. Depending on the light conditions, the annual height increase observed was between 51 and 108 cm yr⁻¹. In addition, growth was analyzed in a stand where the *Pseudotsuga menziesii* was already 26 years old. In this case, the total height of *Pseudotsuga menziesii* trees was still far from the height of the oak stratum, so there has been no danger of competition between the crowns of the two species, nor is there expected to be within the next 20 years. However, in basal area at the stand level, *Pseudotsuga menziesii* has already surpassed *Nothofagus obliqua*, which could indicate the existence of competition for water and/or nutrients between the species. This could be reduced through strong thinning of the Oregon pine stratum with the the pertinent care not to damage the remaining roble. Follow-up management of this mix, including final felling, should be based on the purpose of the future stand and an economic analysis for different options.

Key words: *Nothofagus obliqua*, *Pseudotsuga menziesii*, mixed forests, underplanting.

INTRODUCCIÓN

La cubierta forestal en el centro sur de Chile se caracteriza por la existencia de aproximadamente 1.654.880 ha de renovales del género *Nothofagus* correspondientes al tipo forestal Roble-Raulí-Coihue (CONAF, 2022), donde la especie *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (roble) es la más importante, tanto en términos de superficie como respecto a su actual uso maderero. Al analizar su manejo forestal desde un punto de vista netamente económico, los rendimientos se consideran muy modestos frente a las altas rentabilidades que se obtienen con las especies introducidas de rápido crecimiento, establecidas en forma de plantaciones coetáneas en la misma zona (INFOR, 2021). Los renovales, como respuesta natural a disturbios, en su mayoría de origen antropogénico, normalmente no se han manejado durante los primeros decenios de su existencia. Por el contrario, en muchos casos sufren una alta presión de ramoneo por ganado.

Según el Inventario Forestal Nacional (Müller-Using *et al.*, 2013) en la región de los Ríos un 40% de los Renovales del tipo Roble-Raulí-Coigüe presentan daños por ramoneo de ganado. Recién a partir del estado de desarrollo natural de latizal, cuando atraen el interés de sus propietarios para un uso forestal. Por otra parte, sus crecimientos medio anuales (IMA) entre 10 y 12 m³/ha año (Donoso *et al.*, 1993), considerablemente inferiores a los IMA de las plantaciones con especies exóticas de coníferas, que fluctúan entre 20 y 30 m³/ha año (Espinoza *et al.*, 2017, Büchner *et al.*, 2019), han desincentivado las actividades silviculturales en este tipo de bosque nativo.

Como consecuencia de lo anterior, algunos propietarios forestales privados han favorecido la opción de crear y manejar bosques semi-naturales para mejorar el rendimiento de sus renovales (Mujica *et al.*, 2008; Müller-Using *et al.*, 2016). Esta alternativa de bosques semi-naturales no ha sido acogida por la Ley 20.283 de “Recuperación de Bosque nativo y fomento forestal”, lo que se manifiesta en el hecho de que los bosques seminaturales se encuentran fuera de la definición de bosque nativo y no se aplica subsidio alguno para su manejo.

Sin bien no se consideran subsidios para incentivar el manejo de bosques semi-naturales, la Ley no prohíbe combinar especies autóctonas con introducidas en forestaciones. Es más, desde el punto de vista de la necesidad de adaptar los bosques al cambio climático, y contribuir a su mitigación mediante una adecuada captura de carbono, los bosques mixtos de especies nativas con exóticas son una alternativa que se estudia en diferentes países del mundo (Jandl *et al.*, 2019). Entre las mezclas consideradas para estos fines se encuentra la de *Nothofagus obliqua* con *Pseudotsuga menziesii*. Al respecto, una de las preocupaciones asociadas a la introducción de especies exóticas en el bosque nativo, es el riesgo de que a largo plazo se sustituyan bosques nativos por bosques de especies exóticas. Esto es una preocupación justificada, porque puede ocurrir al mezclar dos especies con diferente comportamiento competitivo, sin manejar su compatibilidad a través de medidas silvícolas adecuadas (Grosse & Müller-Using, 2008).

En el presente trabajo se estudia la compatibilidad de renovales de roble con plantaciones suplementarias de pino oregón. El ejemplo que se escogió para ello se encuentra en un fundo agrícola/forestal en la Comuna de Máfil, Región de los Ríos, donde esta mezcla forma parte del concepto silvícola desde al menos 26 años. Las hipótesis del estudio efectuado son las siguientes:

- (i) Concediéndole un adecuado avance de tiempo y ventaja de crecimiento en altura a la especie nativa, se puede hacer compatible la producción mixta de roble/pino oregón en sitios de buen crecimiento de *Nothofagus obliqua*.
- (ii) Esta mezcla específica genera un crecimiento aditivo en relación a un rodal puro de roble en el mismo sitio.

MATERIAL Y MÉTODO

Ubicación del Estudio

El siguiente trabajo se realizó en el Fundo “Brasil”, Comuna de Máfil, Región de los Ríos, donde desde hace más de 25 años su propietario, Sr. Carlos Ivars, realiza trabajos silvícolas con el fin de agregar valor económico a 150 ha de renovales de *Nothofagus obliqua* (roble) mediante la plantación de individuos de *Pseudotsuga menziesii* (pino oregón) bajo la cobertura de latizales o fustales de roble. Estos renovales de roble, eran en su mayoría de muy baja densidad debido a un proceso de regeneración natural incompleto e inhibido por la alta competencia de *Chusquea quila* (quila). Hubo también algunos rodales con alta densidad, los cuales fueron raleados fuertemente antes de enriquecerlos con pino oregón. El objetivo fue aumentar el traspaso de luz a favor de la nueva plantación, considerando además que después de la faena no sería posible ralear el estrato dominante por un largo período para evitar daños a la plantación.

La ubicación exacta del predio corresponde a las coordenadas 39°43'02,5"S; 72°59'36,7"W. Geográficamente el predio pertenece a los paisajes ondulados del Valle Central, con una altitud media de 110 msnm. Los bosques crecen sobre suelos rojos arcillosos, cubiertos por cenizas volcánicas de diferente espesor con dinámica de trumaos. El clima se caracteriza en el Cuadro 1 con datos proporcionados por la estación “Las Lomas” situada en la cercanía de Máfil. Los 3 meses estivales muy secos, con un total de sólo 16,5 mm de lluvia, indican la tonalidad mediterránea de este clima templado.

Cuadro 1. Datos climáticos de la estación Las Lomas, Máfil.

Variable	2014	2015
Temperatura (°C)	11,5	12
Mes más cálido	enero (17,6°C)	
Mes más frío	junio (7,2°C)	
Precipitaciones (mm)	1750	1800
Mes más seco	enero (0,6 mm)	
Mes más húmedo	julio (335 mm)	

(Fuente: Agromet, 2022)

Diseño Experimental

Para validar las hipótesis planteadas en la introducción, se consideró como indispensable observar el comportamiento de las plantas de pino oregón en la fase inicial de su establecimiento, es decir en su primer decenio de desarrollo, en lo posible con dos o tres diferentes niveles de luminosidad. Tales condiciones se encontraron en las siguientes situaciones representadas por las parcelas 1a, 1b, 1c, 2a y 2b.

Las parcelas 1a, 1b y 1c fueron instaladas en un fustal de roble con un estrato inferior de pino oregón de 5 años de edad. Las condiciones del estrato superior se determinaron con el método de distancia de los 6 árboles más cercanos a un punto central (Prodan, 1965). Con estas subparcelas se abordó 3 condiciones de área basal (AB) y se midió 18 diámetros del fustal. Dentro de estas parcelas de radio variable se seleccionó al azar 25 plantas de pino oregón para determinar sobre cada una de ellas su situación de luminosidad. Con ello se abordó la gama de situaciones lumínicas en el rodal, ya que el grado de cobertura en este fustal era disperejo. A cada planta se le midió además parámetros dasométricos. Los datos mencionados permitieron correlacionar las situaciones de luminosidad con el crecimiento de las plantas.

El mismo procedimiento se aplicó en el segundo set de parcelas. La parcela 2a se estableció en un fustal de roble aparentemente más ralo, que había sido plantado con pino oregón hacía 8 años. La parcela 2b, a su vez, se instaló en un rodal colindante, en una plantación de pino oregón de la misma edad, pero

contando sólo con sombra lateral de los rodales de roble circundantes, faltando sombra vertical. Con este diseño se incluyó tanto a las oscilaciones de luminosidad al interior de dos rodales, como a las diferencias en intensidad de sombra debido a diferentes densidades a nivel de rodal.

También era de interés conocer como continúa el desarrollo de esta mezcla al avanzar su desarrollo, por lo cual se buscó el estado más avanzado de estas plantaciones mixtas en el predio. Estas condiciones se encuentran representadas en un fustal grueso de roble, en el cual el pino oregón ya se encontraba en la fase de desarrollo de latizal. Ahí se localizó la parcela 3.

Mediciones de Luz

En la investigación silvícola se usa desde hace más de 30 años el método de fotografías con un objetivo súper gran angular, denominado “ojo de pez”, para medir la luz que traspasa la cobertura de copas e incide sobre las plantas del sotobosque (Wagner, 1994). Con una cámara fotográfica se toman fotos hemi-esféricas (ángulo de 180°), en blanco y negro, desde el interior del bosque hacia arriba, en dirección perpendicular al suelo. En estas fotos aparece un mosaico de puntos negros (mini-aperturas en el dosel por las que se ve el cielo y que salen en negro en el negativo) y puntos entre gris y blanco que representan los espacios donde hojas o ramas interceptan la luz que viene del exterior. Con estas imágenes y algoritmos publicados en la literatura pertinente se determina el factor indirecto de sitio o ISF (Indirect Site Factor). Las tomas se realizan en condiciones de luz indirecta, eso significa con el cielo homogéneamente cubierto de nubes o, con cielo sin nubes antes del amanecer. En el presente trabajo se usó el aparato “Solariscope” fabricado por la empresa Behling en Alemania y que calcula directamente el ISF. De este modo se pudo avanzar rápidamente con las 25 tomas por parcela y guardar digitalmente los valores requeridos para su posterior uso.

Datos Dendrométricos

Las mediciones de crecimiento en altura y grosor se efectuaron de forma clásica, con altímetro Suunto, forcípula y huincha métrica.

En las parcelas 1 y 2 se midió las alturas de los robles y de las 25 plantas de pino oregón con mediciones de ISF. Además, se midió los brotes terminales (años 2016 – 2017) para conocer el incremento anual en altura, realizado bajo las condiciones de luminosidad actuales. En la parcela 2a y 2b adicionalmente se midió el grosor de 2 ramas de tamaño medio. También se midió los diámetros a altura de pecho (DAP) de los robles incluidos en las parcelas establecidas con el método de Prodan⁴. La edad de los renovales de roble en todo el predio era de aproximadamente 60 años, ya que hubo una cosecha total de los rodales de roble de la generación anterior dentro de un solo año y la generación actual proviene en su mayoría de rebrotes como respuesta a esa cosecha. Para comprobar esta información se extrajo tarugos de árboles de ambas especies en la Parcela 3, a 1,3 m de altura. El análisis de estos tarugos se efectuó en el Instituto de Investigación Forestal del Noroeste de Alemania en Göttingen. Las demás edades de pino oregón se obtuvieron estudiando las respectivas bitácoras de la empresa.

En el caso de la parcela 3 se midió los últimos tres segmentos de crecimiento en altura, en tres árboles volteados con este fin.

Para establecer la significancia en los datos entre subparcelas se realizó un análisis de significancia a través de pruebas t de Student.

⁴ Las parcelas de Prodan son un tipo de parcela que incluye a los 6 árboles más cercanos a puntos de muestreo. En cada punto se mide la distancia al sexto árbol y los diámetros de éste y de los 5 árboles más próximos al punto.

RESULTADOS

Análisis Silvícola

Los resultados de las mediciones de luz y crecimiento en la parcela 1 se presentan en el cuadro 2.

Se encontró que el fustal de roble a sus 60 años de edad y 33 m²/ha de área basal, dejó traspasar un 19% de la luz exterior. Bajo estas condiciones lumínicas las plantas de pino oregón de 5 años de edad mostraron un incremento anual en altura de 50,5 cm entre 2016 y 2017.

La variación de los parámetros medidos en el colectivo de las 25 plantas de pino oregón fue moderada en altura total (17,1%), amplia en el incremento anual en altura (25,9%) y muy amplia en la luz transmitida que estaban recibiendo las plantas (51,3%).

Cuadro 2. Parámetros dasométricos y luminosidad en la parcela 1.

Parámetro	Roble	Pino oregón	Desv. Estándar (Coef. Variación) Pino oregón
Edad (años)	60	5	
Altura total (m)	32,8	1,97	0,337 (17,1%)
Nº de árboles	139	700	
DAP (cm)	46	0,93	0,302 (32,5%)
AB (m ² /ha)	33		
Largo último brote (cm)		50,5	13,096 (25,9%)
Luminosidad (ISF)		19%	9,750 (51,3%)

La dependencia que mostraron las 25 plantas de pino oregón, en sus parámetros Incremento anual del último brote, DAP y altura total, en relación a las respectivas mediciones de luminosidad (ISF) se documenta en las Figuras 1a, 1b y 1c.

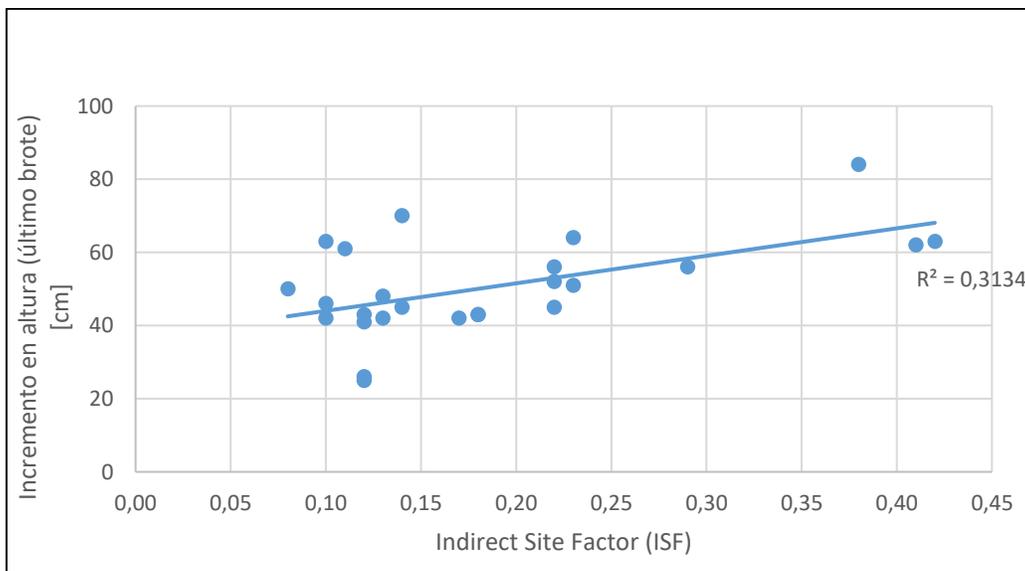


Figura 1a. Regresión lineal entre incremento del último brote e ISF en pino oregón en la parcela 1.

La regresión entre los largos del último brote y los valores ISF muestra alta significancia (0,0004 de probabilidad de error). De la variación total 31% se explican por el factor “luminosidad recibida”. Otro factor importante puede ser la altura de las plantas al momento de la plantación hace 5 años, ya que una planta de buen desarrollo en el vivero suele mostrar mejor desarrollo en altura durante los primeros años. Sin embargo, estas alturas iniciales de las plantas se desconocen.

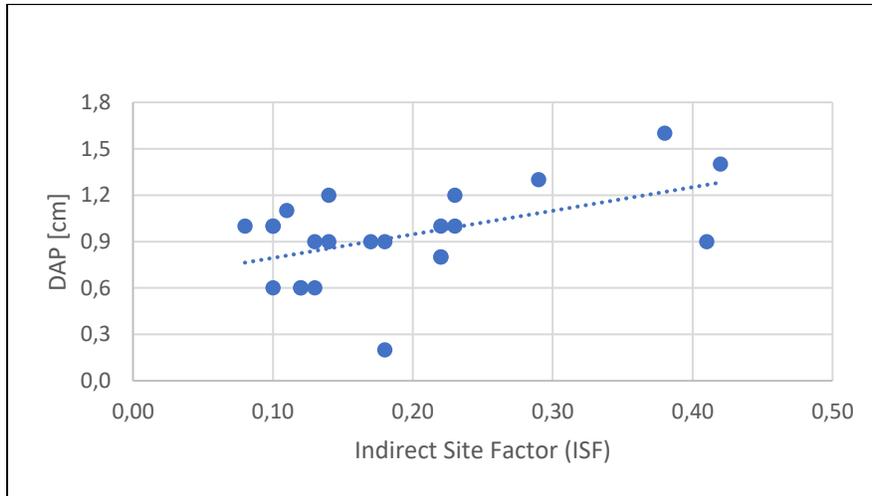


Figura 1b. Regresión lineal entre DAP e ISF en pino oregón en la parcela 1.

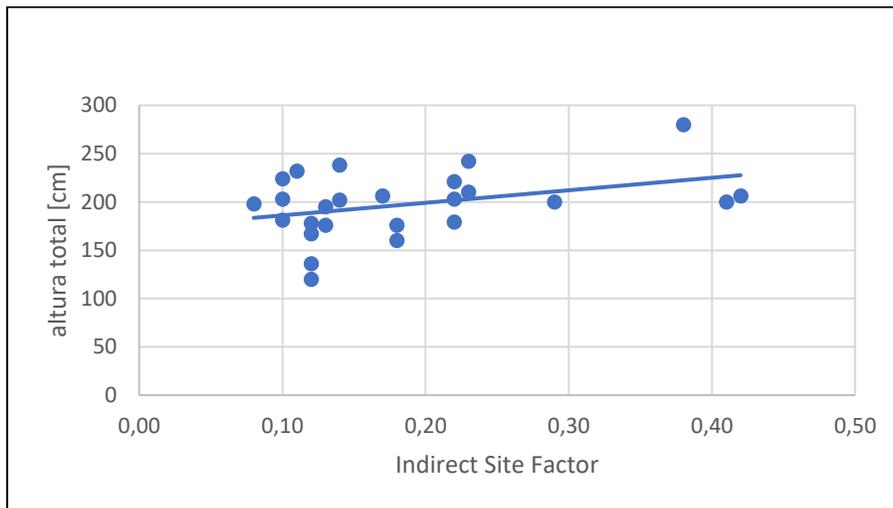


Figura 1c. Regresión lineal entre altura total e ISF en pino oregón en la parcela 1.

Los parámetros DAP y Altura total también muestran dependencia significativa de las condiciones de luminosidad recibida (ISF), pero en menor grado (Coeficientes de determinación (R^2) de 0,25 y 0,14 respectivamente).

El objetivo de incluir las parcelas 2a y 2b fue el de ampliar la gama de luminosidad, al tratarse de un rodal aparentemente más ralo que en la parcela 1 y con una sección de la plantación de pino oregón sin cobertura de robles, pero con sombra lateral desde los bordes de un renewal alto. Los resultados se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3 Caracterización del bosque en las Parcelas 2a (con cobertura) y 2b (sin cobertura).

Parámetro	Roble	Pino oregón			
		Con cobertura	Desv. Estándar	Sin cobertura	Desv. Estándar
Edad (años)	59	8	-	8	-
Altura total (m)	25,4	5,28	0,67		
Nº de árboles	270	700		700	
DAP (cm)	33,7	5,48	0,99	6,24*	0,77
AB (m ² /ha)	24,1			7,26*	1,01
IPA dap últimos 20 años (mm)	7,4				
Largo último brote (cm)		81,4	12,50	107,88*	12,53
Diámetro promedio ramas (cm)		1,29	0,301	1,67*	0,246
Luminosidad (ISF)		33%		60%	

* Diferencia estadísticamente significativa respecto a parcela con cobertura.

El fustal de roble donde se instaló la parcela 2a se encuentra en el mismo rango de edad (promedio de 59 años según conteo de los anillos en los tarugos, tomados a 1,30 de altura) que el rodal de las parcelas 1, pero cuyo crecimiento en altura ha sido más lento. El área basal también es inferior, lo que explica un valor de traspaso de luminosidad más alto (33% contra 19% en las parcelas 1). La mayor densidad puede ser resultado de una menor mortalidad, debido a la mayor transmisión lumínica del dosel dominante.

El largo promedio de los últimos brotes del colectivo de las 25 plantas de pino oregón (81,4 cm) es muy superior a los valores correspondientes de la parcela 1 (50,5 cm), lo que se atribuye a la mayor luminosidad. En la Figura 2a se muestra la relación entre el incremento en altura del último año y los valores ISF. La correlación es menor que en la parcela 1 ($R^2 = 0,313$ en parcela 1 contra $R^2 = 0,142$ en parcela 2a), lo que puede deberse a que la incidencia del factor luz en el incremento en altura, en este rango de luminosidad, ya es menos importante. Sin embargo, la dependencia es todavía significativa.

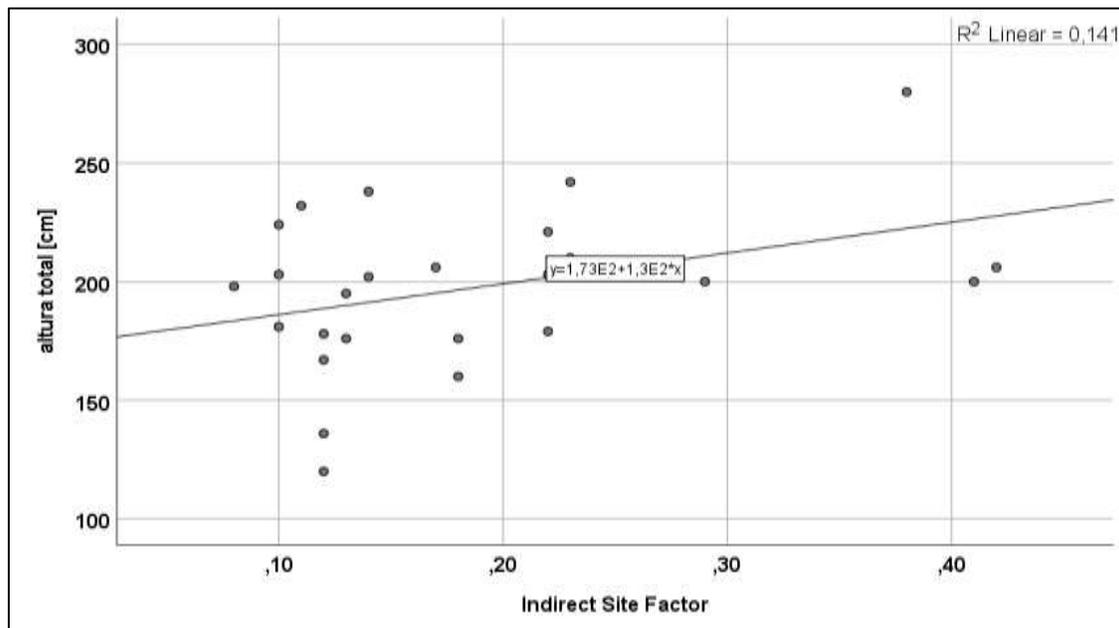


Figura 2a. Regresión entre el largo de los brotes terminales de 25 plantas de pino oregón y los respectivos valores ISF.

Esta tendencia se acentúa aún más si se compara el colectivo “con cobertura” con el colectivo de las plantas “sin cobertura” (Parcela 2b). Con un nivel lumínico de 60% de la luz exterior las plantas de pino oregón parecen liberadas de los frenos impuestos por la sombra. En esta subparcela todos los parámetros de crecimiento muestran superioridad significativa en comparación a la condición de luminosidad del 33% en la parcela 2a (con cobertura).

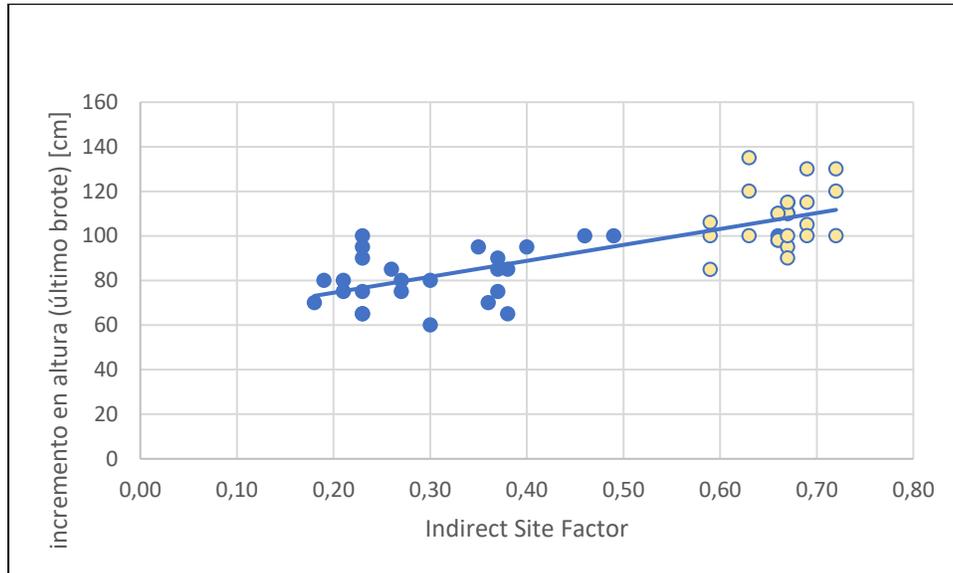


Figura 2b. Relación largo últimos brotes vs. ISF en la Parcela 2. Puntos azules: bajo cobertura puntos amarillos: sin cobertura.

Además de la relación del largo del último brote, altura total y DAP con el ISF, se estudió también la relación del ISF con los parámetros “grosor de ramas” y “esbeltez de fustes” en árboles jóvenes de pino oregón (Figuras 3a y 3b).

Las ramas son significativamente más finas cuando pino oregón crece bajo cobertura que cuando crece a plena luz (Figura 3a). El “grado de esbeltez” o relación entre altura total y DAP, se considera como un índice de estabilidad; esta estabilidad se mostró significativamente más alta en la parcela sin dosel que en aquella con dosel (Figura 3b).

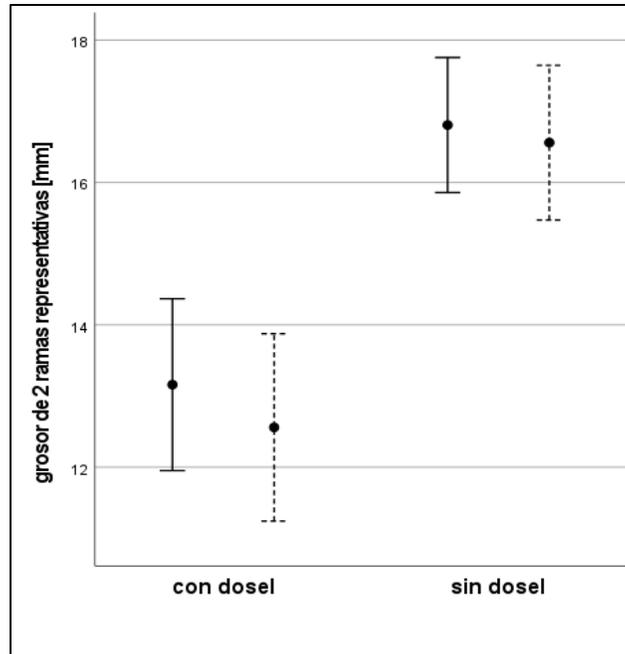


Figura 3a. Diámetro de las dos ramas más gruesas en pino oregón bajo dosel y sin dosel.

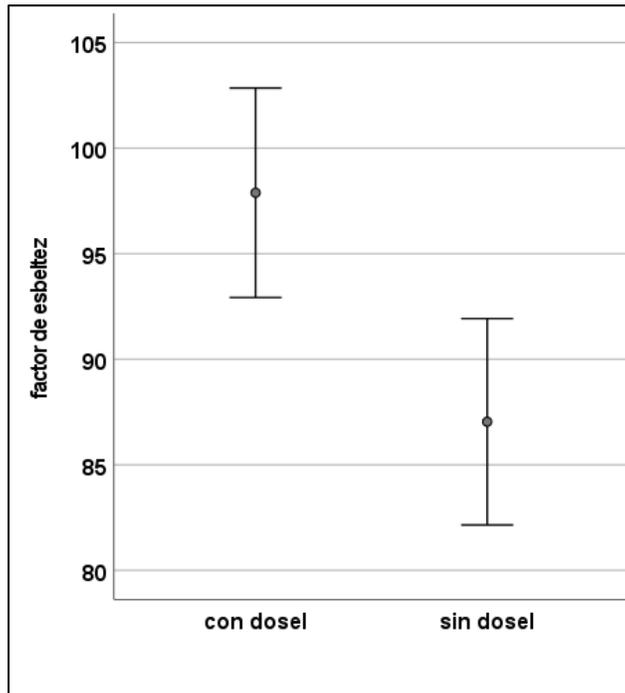


Figura 3b. Grados de esbeltez en árboles jóvenes de pino oregón bajo dosel y sin dosel de roble en la parcela 2.

La parcela 3 se seleccionó para observar la convivencia de las dos especies en mezcla a largo plazo. Los resultados dasométricos, tanto del estrato dominante de roble como para el segundo estrato formado por pino oregón se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Caracterización del bosque mixto de roble y pino oregón en la parcela.

Parámetro	Roble	Pino oregón Con cobertura	Total
Edad (años)	60	26	
Altura total (m)	33	17	
Nº de árboles	99	700	
DAP (cm)	46	22	
AB (m ² /ha)	16,5	25,4	41,9
Volumen utilizable (m ³ /ha)	202	158	360
Incremento periódico anual DAP (últimos 5 años)	5	8,3	
Incremento periódico anual Altura (últimos 4 brotes)		59,5	

Una importante observación es que la mezcla no muestra competencia por luz de parte del pino oregón hacia el roble. El pino oregón, con una altura promedio de 17 m, está lejos de inhibir las copas de los robles, que forman el estrato superior con una altura promedio de 33 m. En número de árboles y en área basal, la participación de roble es más baja que en los rodales 1 y 2. El pino oregón, con su edad de 26 años, ya ha superado significativamente el AB de roble. Es posible que esta masa del segundo estrato ya compita con los robles por agua y nutrientes, debido a que aumenta la intercepción de lluvia y tiene su propio consumo de agua, necesario para haber acumulado la biomasa en este segundo estrato. En la parcela 1 y 2 se demostró el efecto del roble en el crecimiento en altura del pino oregón. Resulta arbitrario calificar la acumulación de biomasa del pino oregón como enteramente aditivo en estos bosques semi-naturales, porque es probable que la creciente competencia por agua y nutrientes generada por el pino oregón haya limitado la densidad de roble, especialmente en los estratos inferiores.

Una curva de las alturas sobre los respectivos diámetros (Figura 4) permite analizar con más detalle la estructura del estrato compuesto por el pino oregón.

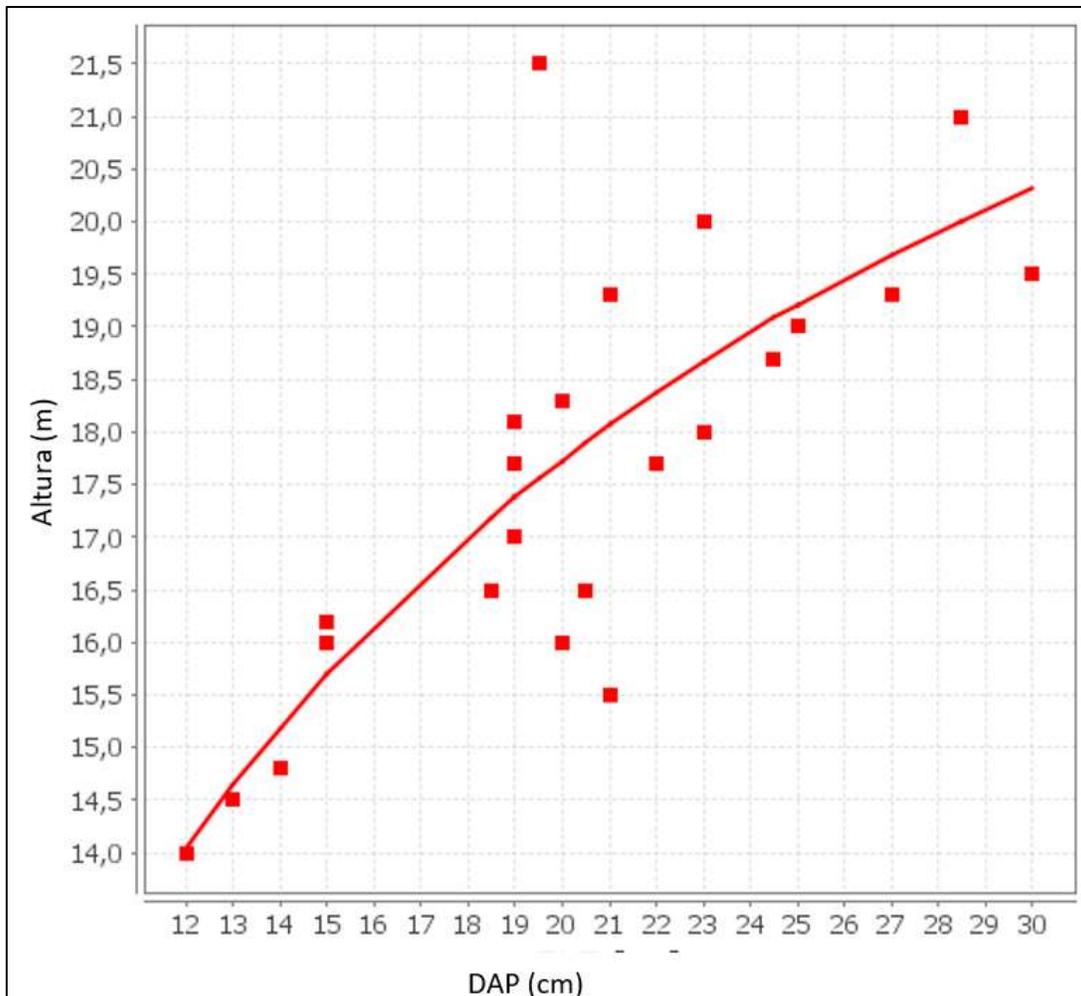


Figura 4. Curva de alturas de una muestra de 25 árboles de pino oregón en la Parcela 3

Al contrario de las fases juveniles del pino oregón en las parcelas 1 y 2, el latizal de 26 años muestra una muy fuerte variación en los parámetros de altura y dap (Figura 4). Las alturas en este colectivo van desde 14 a 21,5 m y los dap desde 12 a 30 cm. Esto es reflejo de una competencia intra-específica entre los individuos de pino oregón, que con alrededor de 700 árboles/ha y un área basal de 25 m²/ha, ha ido alcanzando un grado de ocupación considerable del sitio. Otro factor que puede jugar un rol es la heterogeneidad en densidad del dosel de roble, encima del estrato del pino oregón.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente estudio confirma la clasificación de *Pseudotsuga menziesii* como una especie “semi tolerante”, tal como es informado por [Bartsch et al. \(2020\)](#). Su crecimiento en altura bajo el estrato de roble depende de cuanto luz atraviesa las copas del estrato superior. Bajo las condiciones de sitio aquí estudiadas y con un nivel de alrededor de 20% de la luz exterior, aún alcanza un incremento en altura de 0,5 m/año. Este desarrollo moderado es deseable en el contexto de competencia cuando se encuentra en mezcla con roble. De esta forma se evita que la conífera sobrepase a mediano o largo plazo a la especie latifoliada, riesgo que corre esta mezcla si se plantan las dos especies al mismo tiempo ([Grosse y Müller-Using, 2008](#)). Otra ventaja del desarrollo moderado de pino oregón se evidencia en la comparación del grosor de las ramas que se efectuó en las Parcelas 2a (ISF 33) y 2b (ISF 60). Los diámetros de rama en estas parcelas eran significativamente más bajos que en una plantación de pino oregón sin dosel superior

de roble. Este parámetro es importante para la clasificación cualitativa de los trozos. Algo parecido reportan Siebert *et al.* (2003). Estos autores observaron un desarrollo más fino de las ramas de pino oregón bajo la semi sombra de árboles de *Acacia melanoxylon* al compararlas con lo observado en plantaciones puras.

La tolerancia a la sombra de una especie no es constante en el tiempo a través de las distintas edades (Coopman, 2009) y depende de las condiciones de sitio. Mientras más favorable es el sitio para una especie, más tolerancia muestra a la sombra dentro de su posible rango de respuesta (Röhrig *et al.*, 2006). Como las condiciones de sitio en el área de Máfil son muy favorables, puede ocurrir que, bajo condiciones más pobres, el nivel de ISF alrededor de 20% ya genere una severa y silvícolamente indeseable disminución del crecimiento.

En este estudio se pudo comprobar que hasta una edad de 60/26 años (roble/pino oregón), la conífera se encontraba todavía 13 m debajo de la altura de los robles. Esto significa que al proyectar la actual tasa de incremento anual (60 cm/año) no habría competencia entre las copas de los dos estratos dentro de los próximos 20 años. Al contrario, en el espacio de las raíces, pino oregón sí podría ejercer alguna competencia hacia roble, la cual se podría acentuar en el tiempo, puesto que a la edad 26 años ya ha formado un área basal de 25 m²/ha.

En base a estas cifras se pueden hacer las siguientes conclusiones y recomendaciones para un escenario de futuro manejo: pino oregón con un DAP de 22 cm a la edad de 26 años necesita aún tiempo para alcanzar un nivel de productos satisfactorio, por lo cual se propone dejar crecer el estrato al menos 10-20 años más antes de cosechar. Tanto para su propio desarrollo como para suavizar un efecto negativo sobre el roble (competencia en el estrato de las raíces) se aconseja realizar un raleo en el estrato de pino oregón. El roble, teniendo 60 años de edad y un DAP de 46 cm - si fuera puro - ya hubiera llegado a su diámetro meta, es decir su fase de madurez económica, como lo definieron Müller-Using *et al.* (2021). Sin embargo, cosecharlo en esta fase provocaría enormes daños en el segundo estrato. Se recomienda entonces, también desde este punto de vista, dejar intacto este bosque mixto entre uno a dos decenios más. Llegado el momento, el proceso de la cosecha empezaría con la eliminación del estrato de pino oregón, dejando los árboles de roble para su regeneración natural. Esta faena requerirá un alto grado de planificación y la instalación de vías de saca para evita daño en los robles remanentes. Con este procedimiento se garantiza que la siguiente generación siga siendo de bosque nativo y el enriquecimiento con una especie exótica haya sido solo transitoria, evitando el riesgo de una sustitución no deseada. Para recomendaciones más precisas con respecto a la edad óptima de la corta final debe emprenderse un análisis económico de la opción silvícola aquí descrita.

REFERENCIAS

- Agromet. (2022).** Red Agroclimática Nacional. Datos históricos. En: <https://www.agromet.cl>
- Bartsch, N., von Lüpke, B. & Röhrig, E. (2020).** Waldbau auf ökologischer Grundlage. 8. Edición, P. 152. Editorial Eugen Ulmer. Stuttgart. 676 p. <https://doi.org/10.36198/9783838587547>
- Büchner, C., Martin, M., Sagardía, R., Rojas, Y., Bahamondez, C. Guzman, F., Barrientos, M. et al. (2019).** Disponibilidad de madera en plantaciones de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Regiones Araucanía, Los Ríos, Los Lagos 2019 – 2049. Instituto Forestal. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30351>
- CONAF. (2022).** Reportes estadísticos de los catastros vegetacionales (CONAF) para: Arica y Parinacota, Biobío y Magallanes (2015), Tarapacá (2016), Antofagasta (1997) y Atacama (2018), Coquimbo, Araucanía y Los Ríos (2014), Valparaíso, Metropolitana, Libertador Gral. Bernardo O'Higgins y Los Lagos (2013), Maule (2016) y Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo (2011). Revisados y estandarizados en 2018. En: <https://simef.minagri.gob.cl/herramientas/reporte-estadistico-ver>, Consulta: julio, 2022.
- Coopmann, R. (2009).** La paradoja de una umbrófila dominante del dosel: Cambios funcionales del aparato fotosintético y la estructura del tallo de *Nothofagus nitida* que explican la transición de plántula umbrófila obligada a umbrófila facultativa durante su ontogenia. Tesis doctoral Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 153 p.

- Donoso, P., Monfil, T., Otero, L. & Barrales, L. (1993).** Estudio de Crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las Provincias de Cautín y Valdivia. *Ciencia & Investigación Forestal*, 7(2): 253-287. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.188>
- Espinoza, M., Acuña, E., García, J., Rodríguez, R. & Rubilar, R. (Ed.). (2017).** Silvicultura de Bosques plantados con fines productivos. Editorial Universitaria de Concepción. Concepción, Chile. 397 p.
- Grosse, H. & Müller-Using, B. (2008).** Mezclas coetáneas de especies del género *Nothofagus* y Pino oregón. En Bosques seminaturales, una opción para la rehabilitación de bosques degradados. Infor/Gobierno de Chile/Innova-CORFO. Valdivia. Pp: 67-88.
- INFOR. (2021).** El Sector forestal chileno 2021. Santiago. 52 p.
- Jandl, R., Spathelf, P., Bolte, A. & Prescott, C. (2019).** Forest adaptation to climate change - is non-management an option? *Ann. For. Sci.*, 76, 48. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>
- Müller-Using, S., Martin, M., Siebert, H., Müller-Using, B., Uribe, J.L. & Rojas, Y. (2013).** Antecedentes y Herramientas para la Regeneración del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe. Reporte de Prácticas silvícolas 2013. Informe Técnico 197. INFOR. 50 p.
- Müller-Using, B., Uhde, B., Varas, A., Cabrera, J., Cuevas, W. & Gonzáles, D. (2016).** The mixture of *Nothofagus* species with *Pseudotsuga menziesii* in South Central Chile. *Forstarchiv*, 87(6):175-181.
- Müller-Using, S., Rojas, Y. & Martin, M. (2021).** Una propuesta para la definición de un diámetro meta para los renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) *Ciencia & Investigación Forestal*, 27 (3): 49-61. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.553>
- Mujica, R., Grosse, H. & Müller-Using, B. (Ed.). (2008).** Bosques seminaturales, una opción para la rehabilitación de bosques degradados. INFOR, Gobierno de Chile, Innova/CORFO. ISBN 978-956-318-012-01. Valdivia, 165 p.
- Prodan, M. (1965).** Holzmesslehre. Editorial Sauerländer's. Frankfurt. 323 p.
- Röhrig, E., Bartsch, N. & von Lüpke, B. (2006).** Waldbau auf ökologischer Grundlage 7. Edición, P. 99. Editorial Eugen Ulmer, Stuttgart. 479 p.
- Siebert, H., von Einsiedel, A. & Truchsess, A. (2003).** Mejoramiento de la calidad fustal en plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* al crecer en asociación con *Acacia melanoxylon*. *Bosque*, 24(3): 75-83. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000300008>
- Wagner, S. (1994).** Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos: Methode und Anwendung. Ber. Forschungsz. Waldökosysteme Uni Göttingen A123.



ARTÍCULO

Crecimiento de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser) en un ensayo de progenies y procedencias de 22 años en la Reserva Nacional Coyhaique, Chile.

Braulio Gutiérrez C.^{1*}, Hans Grosse W.², Iván Moya N.³, Jaime Salinas S.³; Bernardo Acuña A.³ & Exequiel Díaz V.³

¹ Instituto Forestal, sede Biobío. bguetierr@infor.cl

² Instituto Forestal sede Metropolitana.

³ Instituto Forestal, sede Patagonia

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.570>

Recibido: 20.07.2022; Aceptado 19.08.2022

RESUMEN

Se evalúa el crecimiento en altura y diámetro de tres procedencias de lenga (*Nothofagus pumilio*) de la región de Aysén, Chile, creciendo en un ensayo de procedencias y progenies de 22 años en la Reserva Nacional Coyhaique (18G 731322,56 E; 4953466,59 S). El crecimiento general del ensayo resultó relativamente bajo respecto a datos bibliográficos de comparación. No se observan diferencias estadísticamente significativas para altura y diámetro entre las procedencias evaluadas y se discute las posibles causas de esta situación. Se entregan antecedentes que respaldan la necesidad de reducir la cobertura del dosel de protección para mejorar el crecimiento de los árboles y permitir se expresen las diferencias potenciales existentes entre los distintos materiales genéticos ensayados.

Palabras clave: *Nothofagus pumilio*, crecimiento, procedencias

SUMMARY

The growth in height and diameter of three provenances of lenga (*Nothofagus pumilio*) from the Aysén region, Chile, growing in a provenance and progeny trial of 22 in the Coyhaique National Reserve (18G 731322.56 E, 4953466.59 S) is evaluated. The overall growth of the trial is relatively low with respect to comparative literature data. No statistically significant differences were observed for height and diameter between the evaluated provenances; the possible causes of this situation are discussed. Background information is provided to support the need to reduce canopy cover to improve tree growth and allow the expression of the potential differences between the different genetic materials tested.

Key words: *Nothofagus pumilio*, growth, provenances

INTRODUCCIÓN

En Chile los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) se distribuyen ampliamente entre las regiones del Maule y de Magallanes, abarcando más de 20° de extensión latitudinal (35° a 56° Lat. S). Son el segundo Tipo Forestal más abundante de los bosques nativos chilenos, después del Siempreverde, y representan del orden del 25% de la existencia de bosques naturales en el país.

Los bosques de lenga cubren una superficie de 3,63 millones de hectáreas, de las cuales el 75% se concentra en las regiones australes de Aysén y Magallanes, donde presenta algunas características que los hacen especialmente interesantes para sustentar una actividad productiva sustentable. En efecto, en

estas regiones las formaciones de lenga han contribuido importantemente a sostener la economía regional (Gutiérrez & Molina, 2006; Salinas *et al.*, 2019).

Atendiendo a las potencialidades que ofrece este recurso, resulta de interés mejorar su productividad, y para este efecto la aplicación de técnicas de mejoramiento genético resulta particularmente apropiada. Una forma práctica de conocer la variabilidad genética, es mediante ensayos de procedencia, o ensayos anidados de progenies dentro de procedencias, los que pueden generar valiosa información para orientar el mejoramiento mediante la identificación de los orígenes e individuos idóneos para la restauración y aprovechamiento comercial del recurso mediante establecimiento de plantaciones con semilla mejorada genéticamente obtenida de individuos más apropiados para cada fin (Ipinza & Gutiérrez, 2015).

En el contexto indicado, en el presente artículo se evalúa un ensayo de procedencias de lenga de 22 años de edad, con el objetivo de comparar el desempeño inicial de material genético procedente de tres poblaciones de lenga en la región de Aysén; cuantificar y calificar su crecimiento; y obtener conclusiones para orientar el manejo silvícola del ensayo.

MATERIAL Y MÉTODO

Ensayo Evaluado

Corresponde a una prueba de progenies de lenga establecida el año 2000 en la Reserva Nacional Coyhaique (Figura 1), en el marco de una iniciativa de mejoramiento genético por poblaciones múltiples, en la que se involucran familias de tres poblaciones (procedencias): Mallín Grande, Cerro Catedral y Río Cajón, todas de la región de Aysén (Cuadro 1).

El ensayo está plantado en fajas habilitadas bajo el dosel de una plantación de coníferas pre-existente, a un espaciamiento de 3x8 metros (3 metros en la faja y 8 metros entre fajas). El módulo evaluado, consta de 26 bloques, cada bloque está constituido por 39 plantas distribuidas en tres fajas y 13 filas. El diseño considera que cada planta pertenece a una familia, identificada por un código individual (Figura 2). El número de progenies y plantas por cada procedencia se detalla en el Cuadro 1.



Figura 1. Ubicación de ensayos de progenies de lenga en la R.N. Coyhaique (Coordenadas 18G 731322,56 E, 4953466,59 S).

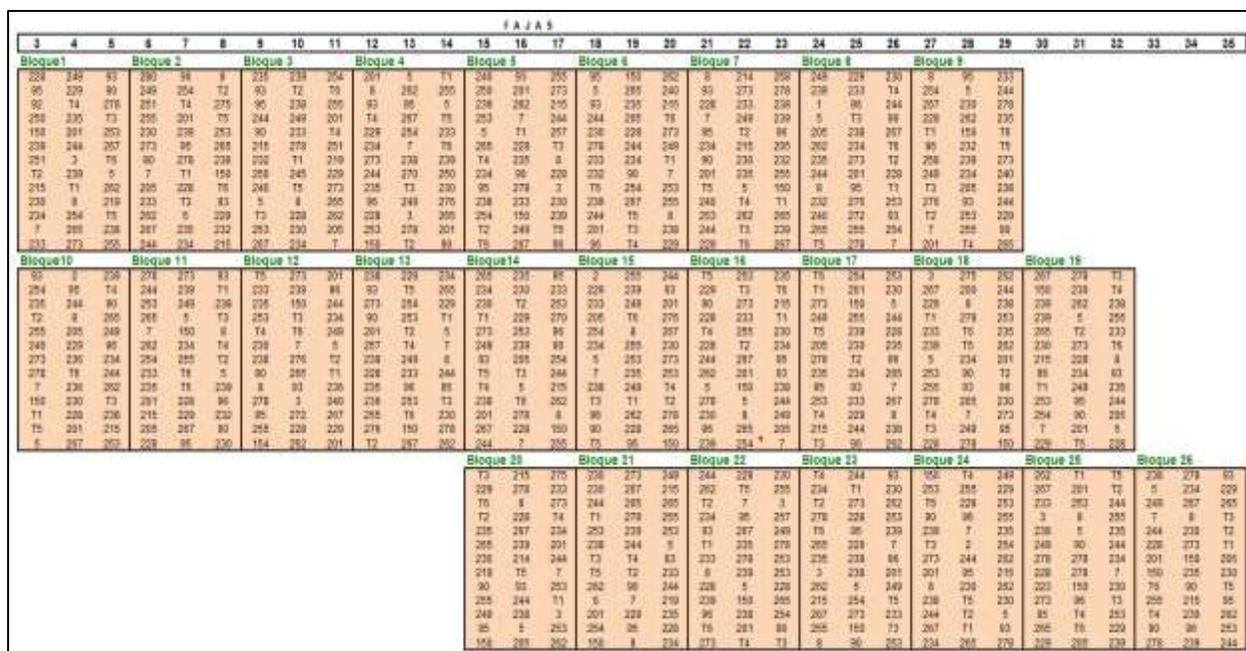


Figura 2. Esquema de plantación y distribución de bloques del ensayo de Lengua en la R.N. Coyhaique.

Cuadro 1. Número de progenies y plantas consideradas en cada procedencia del ensayo de Lengua en la R.N. Coyhaique.

Procedencia	Ubicación respecto a ciudad de Coyhaique	Clima*	N° de progenies	N° de plantas
Mallín Grande	280 Km al S	Estepario Frío. Pp: 300-400 mm/año	39	634
Cerro Catedral	150 Km al NE	Trasandino con Degeneración Esteparia Pp: 900-1300 mm/año T° media: 8,7°C	9	98
Río Cajón	140 Km al SO	Marítimo Frío Lluvioso de la Costa Occidental Pp: 2.800 mm/año T° media: 9°C	8	127
Testigos	Progenies usadas como conectores para relacionar con otros ensayos		6	155
Total			62	1.014

(Fuente: Olivares, 2010; Ipinza y Gutiérrez, 2015)

* según clasificación de Köppen (1948)

Medición

Durante el mes de abril de 2022, técnicos especializados de INFOR identificaron los árboles del ensayo, usando etiquetas plásticas y plumones indelebles de oleo (Figura 3) y efectuaron la medición correspondiente a la edad de 22 años del mismo. Para cada árbol se registró el valor de las variables altura (ALT) y diámetro a 1,3 m de altura (DAP), la primera expresada en metros con dos decimales y la segunda en centímetros con un decimal. Se registró también algunas observaciones adicionales de interés para orientar la evaluación. La medición se realizó con vara telescópica (Figura 4) y huincha diamétrica, las que atendiendo al tamaño de los árboles y condiciones del rodal resultaban más prácticas que los tradicionales hipsómetros y forcípulas.



Figura 3. Etiquetas de identificación de los árboles del ensayo de procedencias y progenies de lenga en la R.N. Coyhaique.



Figura 4. Medición de los árboles del ensayo de procedencias y progenies de lenga en la R.N. Coyhaique.

Evaluación de Datos

La digitación de los datos registrados en la medición de terreno dio origen a una base de datos. Esta fue depurada eliminando del análisis los registros de los árboles muertos y verificando la ausencia de datos anómalos o fuera del rango definido por el promedio ± 3 desviaciones estándares. Los valores de altura y diámetro fueron estandarizados, y posteriormente sometidos a un análisis de varianza no paramétrico

mediante la prueba de Kruskal y Wallis⁵, con el objeto de verificar la existencia de diferencias significativas en el crecimiento de altura y diámetro entre procedencias y familias dentro de las procedencias.

Los datos obtenidos se complementaron con información registrada en mediciones anteriores (2003, 2005, 2008 y 2011) correspondientes a las edades de 3, 5, 8 y 11 años. Los valores de crecimiento se discuten, analizan y compran con antecedentes bibliográficos de crecimiento de renovales de lenga.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento

La evaluación descriptiva inicial de la base de datos depurada del ensayo indica que, a los 22 años de edad, presenta una supervivencia del 68,7%, con una altura y dap promedios de 3,47 m y 4,78 cm respectivamente. El crecimiento observado equivale a un incremento medio anual (IMA) de altura de 15,8 cm/año y de 0,22 cm/año para el dap, correspondiendo a un desarrollo incipiente, donde la mayoría de los individuos se concentran en las clases más bajas de las variables analizadas (Figura 5).

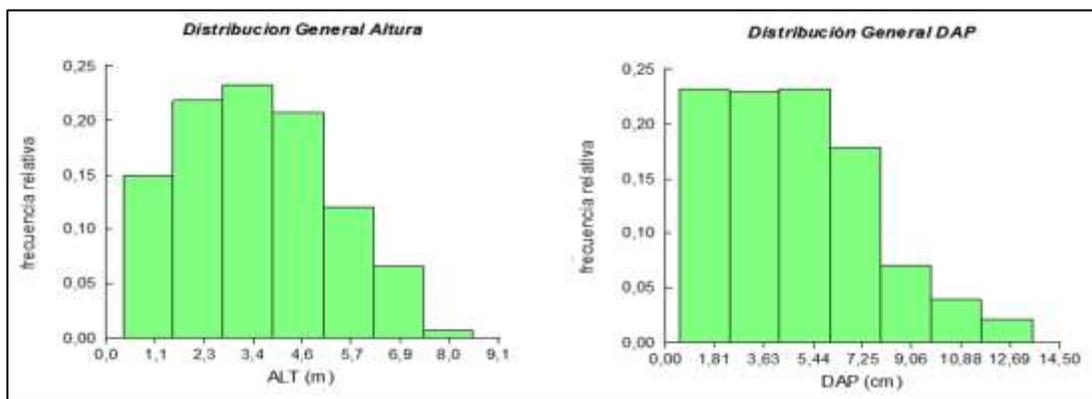


Figura 5. Distribución de frecuencias relativas de altura (izq) y diámetro (der) en ensayo de procedencias de lenga de 22 años en RN Coyhaique.

Respecto al crecimiento observado, registros de mediciones previas, efectuadas a los 3, 5, 8 y 11 años, permiten cuantificar el decrecimiento del incremento medio anual de altura para el ensayo en su conjunto (Cuadro 2).

Cuadro 2. Evolución del Incremento Medio Anual (IMA) de la altura para el ensayo de lenga en su conjunto.

Año	Edad (años)	IMA Altura (cm/año)
2003	3	30,3
2005	5	21,0
2008	8	19,3
2011	11	18,2
2022	22	15,8

⁵ Esto por cuanto ninguna de las variables cumplió con los supuestos requeridos para análisis paramétrico; según la prueba de Shapiro y Wilks los residuos no se distribuían normalmente y la homogeneidad de varianzas, mediante prueba F, solo se verificó para la altura y no para el diámetro

El ensayo exhibe relativamente poco crecimiento en altura respecto del registrado para bosques naturales de lenga. En efecto el incremento en altura observado en el ensayo (15,8 cm/año) es escaso frente a los 20 cm/año indicados por [Larson \(2000\)](#) para lengas de 90 años, y más escaso aun ante los 25 a 35 cm/año indicados por [Manosalva \(1995\)](#) para lengas de 70 años. El ensayo presenta un incremento en altura que coincide con el límite inferior del rango indicado por [Salinas et al. \(2019\)](#), quienes señalan que el crecimiento de lenga en altura es moderado y que su incremento medio anual en Aysén varía entre 14 y 27 cm/año.

En términos de diámetro, el crecimiento del ensayo (2,2 mm/año) se enmarca en los valores reportados en la bibliografía. [Salinas et al. \(2019\)](#) mencionan valores de 1,91 y 1,17 mm/año para renovales de lenga entre los 20 y 30 años con y sin manejo. Los mismos autores señalan para un rodal de 40 a 50 años de edad en la R.N. Coyhaique valores que permiten estimar incrementos medios anuales de diámetro de 1,71 mm/año para arboles suprimidos; 2,76 mm/año para intermedios y 4,23 mm/año para dominantes. [Schmidt y Urzúa \(1982\)](#) señalan que en condiciones naturales la lenga presenta un incremento diametral muy bajo, alcanzando en promedio un valor de 1,7mm/año; sin embargo, reconocen situaciones cuyos incrementos diametrales promedio son superiores a los 4mm/año. Para el caso de los renovales sometidos a raleo, el incremento diametral medio va desde 2,1 hasta 4,9 mm/año ([Larson, 2000](#)). Para un bosque natural en Aysén, [Sievert \(1995, cit. por Troncoso, 2004\)](#) señala valores de incremento diametral anual promedio de 1,91 mm/año, variando desde un mínimo de 0,5 mm/año hasta un máximo de 5mm/año. Antecedentes citados por [Troncoso \(2004\)](#) indican que, luego de una corta de regeneración, se obtuvo crecimientos diametrales de entre 2,8 a 3,1mm/año en árboles juveniles y maduros en rodales de Magallanes continental, y en Tierra del Fuego, incremento en diámetro de individuos juveniles de 1,1 a 2,1mm/año; en individuos maduros de 1,0 a 1,4 mm/año; y en sobremaduros de 1,0 a 1,3 mm/año ([Troncoso, 2004](#)).

En condiciones naturales los árboles de lenga tienen un buen crecimiento juvenil en altura, mientras crecen bajo dosel o protegidos por el relieve y la posición topográfica, limitándose su crecimiento al momento en que los individuos del dosel superior se ven expuestos a la acción mecánica y al efecto secante del viento ([Bastías, 2005; Labarthe, 2005](#)). Sin embargo, el ensayo presenta poco crecimiento a pesar de contar con la protección del dosel de coníferas, y de no haber sobrepasado la altura de las mismas.

El crecimiento en altura y diámetro de renovales de lenga está influenciado por la luz que reciben los árboles, y exhiben los mejores crecimientos en áreas de menor cobertura, consecuentemente con la baja tolerancia de la especie a la sombra. En efecto, [Guerra y Correa \(1973\)](#), consideran a la lenga como una especie intolerante, aunque también puede actuar como medianamente tolerante y desarrollarse bajo dosel ([Donoso, 1978; Rodríguez et al., 1983](#)). En efecto, [Peri et al \(1996, cit. por Salinas et al., 2019\)](#) confirman que el desarrollo diamétrico de lenga depende de la posición social de su copa, que su ritmo de crecimiento es distinto bajo diferentes condiciones de competencia, y que los arboles dominantes presentan mayor incremento diamétrico (3,3 mm/año) que aquellos suprimidos 1,92 mm/año).

La situación descrita y las observaciones de terreno sugieren que la cobertura del dosel de protección del ensayo está limitando su crecimiento, y que la reducción de esta cobertura mejoraría su crecimiento. La reducción del dosel de protección coincide con las propuestas silvícolas para bosques naturales de lenga, las cuales se basan precisamente en la apertura del dosel para estimular el crecimiento de la regeneración, Sobre este particular [Martínez-Pastur et al. \(2008\)](#) indican que las plantas de lenga pueden mantenerse como si fueran especies tolerantes y crecer lentamente por más de 20 años bajo altas coberturas, situación equivalente a la que enfrenta en la actualidad el ensayo analizado; sin embargo, cuando el dosel superior se abre, las plantas reaccionan como una especie intolerante y aumentan su crecimiento, respaldándose así la postura de abrir las fajas de protección que cubren al ensayo.

Diferenciación entre Procedencia

A nivel de las procedencias consideradas en el ensayo, el mejor desempeño lo presentan las plantas de Mallín Grande, respecto a los testigos y a las procedencias de Cerro Catedral y Río Cajón, sin embargo,

estas diferencias no alcanzan a tener significancia estadística (Cuadro 3). Respecto de las progenies dentro de las procedencias tampoco se detectó diferencias significativas de crecimiento.

Cuadro 3. Valores medios de altura, diámetro y supervivencia de ensayo de lenga de 22 años en la R.N. Coyhaique

Procedencia	n	Altura (m)	DAP (cm)	Superviv. (%)
Cerro Catedral	98	3,27 ^a	4,27 ^a	66,33
Mallín Grande	634	3,54 ^a	4,95 ^a	70,98
Río Cajón	127	3,13 ^a	4,11 ^a	59,84
Testigo	155	3,54 ^a	4,80 ^a	68,39
p-value		0,2718	0,1254	
Total general	1.014	3,47	4,78	68,74

Si bien los valores actuales de crecimiento en altura y dap indican que las diferencias entre procedencias no son significativas, estas diferencias se han venido incrementando respecto a los valores observados a edades más tempranas. En efecto, la misma secuencia histórica de mediciones, sugieren una tendencia hacia la diferenciación de las procedencias (Figura 6), la que probablemente se hará más evidente en las mediciones futuras. En esta directriz se insinúa una diferenciación creciente de las procedencias Mallín Grande y Río Cajón, correspondientes a las de mejor y peor desempeño, respectivamente, tanto en crecimiento como en supervivencia.

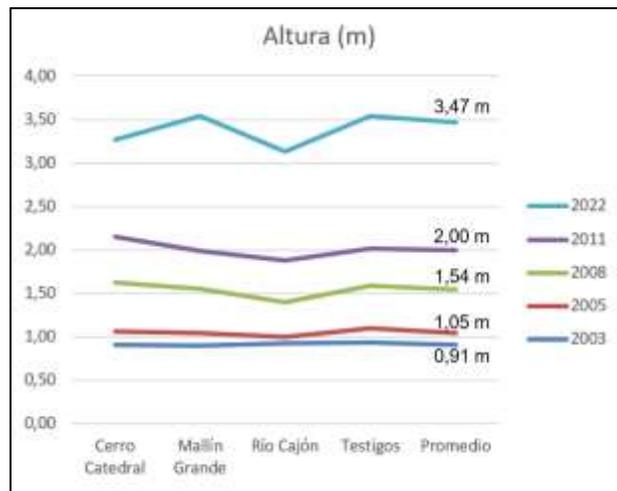


Figura 6. Evolución de la altura entre los 3 y 22 años para 3 procedencias de lenga

La falta de diferenciación puede obedecer al temprano estado de desarrollo de las plantas, esperándose tal como lo sugiere la figura 6, que estas diferencias sean más evidentes en el futuro, a medida que avanza el desarrollo de los árboles y se elimine el exceso de cobertura que está enmascarando el crecimiento potencial de los distintos materiales genéticos ensayados.

La ausencia de diferenciación entre procedencias y progenies observada en el ensayo de lenga de la R.N. Coyhaique coincide con la situación observada en otros ensayos similares de *Nothofagus*: La evaluación de un ensayo de roble (*Nothofagus obliqua*) de 16 años en Valdivia, concluyó que la altura

tiene un desarrollo muy homogéneo y no presenta diferencias de relevancia estadística entre los valores medios de progenies, procedencias, ni regiones de procedencia, indicándose una mayor diferenciación para el diámetro, y consecuentemente para el volumen, el cual está estrechamente relacionado con esta variable (Gutiérrez, 2020 a); En prueba de procedencias y progenies de coigüe tampoco se detectó diferencias de desempeño entre zonas de procedencia (Gutiérrez, 2020 b), lo mismo ocurrió en pruebas efectuadas con lenga (Mondino *et al.*, 2010).

Respecto a este fenómeno de escasa variabilidad entre procedencias, Hasbún *et al.* (2014) establecen que en distribuciones extensas y relativamente continuas existe un elevado flujo génico que reduce la divergencia genética entre las poblaciones. Este efecto ha sido demostrado en estudios de variabilidad isoenzimática de coigüe, donde la variación genética se encuentra principalmente dentro de las poblaciones, mientras que entre poblaciones resulta muy bajo (Donoso *et al.*, 2004). Adicionalmente, estudios con marcadores moleculares efectuados para otras especies de *Nothofagus* con extensas áreas de distribución concluyen la existencia de bajos niveles de diferenciación genética poblacional o entre localidades (Hasbún *et al.*, 2014). Posiblemente esta misma situación explica la escasa diferenciación observada en el ensayo de lenga de la R.N. Coyhaique.

CONCLUSIONES

El ensayo evaluado exhibe un crecimiento relativamente bajo en relación al registrado en bosques naturales de lenga con y sin manejo. Esta situación se atribuye a la densidad del dosel de protección, sugiriéndose reducir esta cobertura para mejorar el crecimiento del ensayo.

El crecimiento observado no presenta diferencias de significancia estadística entre las procedencias evaluadas, aspecto que también ha sido observado en otras evaluaciones reportadas en la bibliografía, situación que podría obedecer a un exceso de cobertura de protección o al aún incipiente estado de desarrollo de las plantas del ensayo. Se especula que la diferenciación podría aumentar en el futuro, tal como lo sugiere la tendencia observada en el registro histórico de mediciones del ensayo.

Considerando el ciclo de vida y rotación de lenga, el ensayo es aún juvenil de modo que las evaluaciones futuras, a una edad más avanzada, serán más apropiadas para apoyar las decisiones involucradas en el programa de mejoramiento de lenga.

A pesar de los resultados descritos, el ensayo mantiene una relativamente amplia base genética y una estructura familiar adecuada para determinación de parámetros genéticos. Por lo mismo es recomendable su manejo y conservación.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección Regional de Conaf, a la Administración de la Reserva Nacional Coyhaique y a todos sus profesionales y personal técnico, por la excelente disposición y colaboración en todos los aspectos relacionados con la conservación y mantención del ensayo en dependencias de su administración, así como por las facilidades otorgadas para su visita y evaluación.

REFERENCIAS

- Bastías, M. (2005).** Composición de especies y cobertura del sotobosque en bosques vírgenes de Lenga (*Nothofagus Pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) en Monte Alto, XII Región. Tesis de Grado. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago. 83 p.
- Donoso, C. (1978).** Dendrología. Árboles y arbustos chilenos. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Manual N° 2. 142 p.

- Donoso, C., Premoli, A. & Donoso, P. (2004).** Variación en *Nothofagus* siempreverdes sudamericanos. En: Donoso, C., Premoli, A.; Gallo, L. & Ipinza, R. (Eds). Variación Intraespecífica en las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. Capítulo 8. Pp: 189-214.
- Guerra, G. & Correa, J. (1973).** Tolerancia de las principales especies nativas chilenas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Boletín Técnico N° 27. 50 p.
- Gutiérrez, B. (2020 a).** Desempeño de progenies, procedencias y regiones de procedencias de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst). Ciencia & Investigación Forestal, 26(3): 33-50. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.536>
- Gutiérrez, B. (2020 b).** Influencia del origen de las semillas en el desempeño de coigüe (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) en la costa y precordillera de la región de Los Ríos. Ciencia & Investigación Forestal, 26(2): 31-43. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.531>
- Gutiérrez, B. & Molina, M. (2006).** La especie forestal lenga. En: Gutiérrez, B. (Editor). Clonación de lenga (*Nothofagus pumilio*): Síntesis de los resultados del proyecto INNOVA CHILE 02C8FT-05: "Masificación de genotipos de interés comercial de lenga en la XI región". Instituto Forestal. Concepción, Chile. Pp: 11-30. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17879>
- Hasbún, R., Ruiz, E., Ríos, D., Fuente, G. & Alarcón, D. (2014).** Certificación genética del origen de materiales reproductivos de coigüe mediante herramientas moleculares y nichos ecológicos. Informe Final Proyecto FIBN-CONAF 068/2012. Universidad de Concepción, Concepción. Octubre 2014. 59 p
- Ipinza, R. & Gutiérrez, B. (2015).** Evaluación genética a los 8 y 11 años de un ensayo de progenies de Lenga (*Nothofagus pumilio*) en la Reserva Nacional Coyhaique, Región de Aysén. En: Gutiérrez, B., Ipinza, R. & Barros, S. (Eds). Conservación de Recursos Genéticos Forestales: Principios y Prácticas. Instituto Forestal. Concepción. Chile. Pp: 269-286. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20830>
- Köeppen, W. (1948).** Climatología: Con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Económica. México 463 p.
- Labarthe, F. (2005).** Efecto de la tasa de crecimiento en las propiedades mecánicas de lenga en un renoval en Tierra del Fuego. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 84 p.
- Larson, J. (2000).** Crecimiento de la Lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser en un bosque secundario de la XII Región. Memoria de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 56 p.
- Manosalva, L. (1995).** Antecedentes Dendrométricos Básicos de un Rodal de Lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl. Krasser), en el Sector Cerro la Virgen, XI Región. Memoria de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. 69 p.
- Martínez Pastur, G., Lencinas, M.V. & Peri, P.L. (2008).** Functional ecology of *Nothofagus pumilio* regeneration in relation to light availability. Ciencia & Investigación Forestal, 14(1): 45-53. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2008.90>
- Mondino, V., Tejera, L., Pastorino, M. & Gallo, L. (2010).** Establecimiento en *Nothofagus pumilio*: efecto de plantas nodrizas y procedencias. Poster. Estación Experimental Agroforestal Esquel, Centro Regional Patagonia Sur, INTA Argentina.
- Olivares, C. (2010).** Evaluación genética de un ensayo de procedencia progenies de *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, "Lenga" ubicado en la Reserva Nacional Coyhaique. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Escuela de Ciencias Forestales. Santiago. 49 p.
- Rodríguez, R.; Matthei, S. & Quezada, M. (1983).** Flora arbórea de Chile. Editorial de la Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 355 p.
- Salinas, J., Riquelme-Espargue, F., Acuña, B. & Uribe, M.A. (2019).** Crecimiento de renovales de Lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser) en el sur austral de Chile. Ciencia & Investigación Forestal, 25(3): 35-66. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.520>.
- Schmidt, H. y Urzúa, A. (1982).** Transformación y manejo de los bosques de Lenga en Magallanes. Ciencias Agrícolas N° 11. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Santiago. 62 p.
- Troncoso, O. (2004).** Desarrollo de un bosque de Lenga (*Nothofagus Pumilio*) después de la corta de protección en la XII región. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. 55 p.



APUNTE

Antecedentes de abastecimiento de biomasa con fines energéticos, el caso del pellet en Chile.

Juan Carlos Pinilla S.^{1*}, Karina Luengo V.¹, Mauricio Navarrete T.¹, Felipe Navarrete U.¹

¹Instituto Forestal, Sede Biobío, Chile. jpilla@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.565>

Recibido: 13.07.2022; Aceptado 26.07.2022

RESUMEN

En Chile la producción, demanda y consumo del pellet presenta un permanente crecimiento, utilizando en este proceso subproductos derivados principalmente de la industria del aserrío y remanufactura de pino radiata. El crecimiento de la industria del pellet se deriva de problemas de contaminación ambiental atribuibles al mal uso de la leña, a programas de descontaminación, comodidad de su uso y por cambios culturales de los usuarios. En la producción de pellet, la calidad y cantidad de biomasa forestal es fundamental, permitiendo reducir emisiones de CO₂ (mitigación) y con ello, garantizar el rendimiento y eficiencia. Una gran contrariedad de la industria del pellet es la incertidumbre respecto al abastecimiento de biomasa en cantidad y calidad adecuada, para responder a la demanda, por cuanto la variación en la actividad del aserrío afecta directamente a la disponibilidad de subproductos que son la materia prima para el pellet.

En apoyo al fortalecimiento de la industria del pellet en Chile, se presentan antecedentes respecto a disponibilidad y características de los subproductos que son potencialmente utilizables como materia prima, sus perspectivas, y opciones para suplir los mayores requerimientos de biomasa. Lo anterior con el objetivo de favorecer el desarrollo de las energías renovables y contribuir a la diversificación de la matriz energética, a partir de las potencialidades del territorio forestal del país. Se concluye que la estrecha relación entre la industria maderera y la productora de pellet, representa un escenario donde esta última actualmente tiene un límite que está dado por la oferta de biomasa de subproductos proveniente de la industria del aserrío.

Palabras clave: Pellet, biomasa, abastecimiento, calidad

SUMMARY

In Chile, the production, demand and consumption of pellets is growing steadily, using raw materials derived mainly from the sawmill and remanufacturing industry of radiata pine. The growth of the pellet industry is a consequence of environmental pollution problems attributable to the misuse of firewood, decontamination programs, convenience of use and cultural changes of users. In pellet production, the quality and quantity of forest biomass is fundamental, allow reducing CO₂ emissions (mitigation) and thus guaranteeing performance and efficiency. A major drawback of the pellet industry is the uncertainty regarding the supply of biomass in adequate quantity and quality to meet the demand, since the variation in sawmill activity directly affects the availability of raw material for pellets.

In support of the pellet industry in Chile, background information is presented regarding the availability and characteristics of by-products that are potentially usable as raw material, their prospects, and options to meet the increased biomass requirements. The above with the objective of favoring the development of renewable energies and contributing to the diversification of the energy matrix, based on the potential of the country's forest territory. It is concluded that the close relationship between the timber industry and the pellet producing industry represents a scenario where currently the last one has a limit that is given by the supply of biomass by-products from the sawmill industry.

Key words: Pellet, biomass, supply, quality.

INTRODUCCIÓN

Entre otras múltiples funciones, los bosques pueden proveer una fuente de energía renovable, que apoye los procesos de diversificación de la matriz energética, la generación de energías limpias, los procesos de mitigación del cambio climático, la reducción de la pobreza energética y aportar materia prima para apoyar los emprendimientos en el área de la dendroenergía.

La biomasa es reconocida como una energía renovable, que permite reducir emisiones de CO₂ (mitigación). Su uso adecuado garantiza el rendimiento y eficiencias de las instalaciones. Además, es una energía renovable estable y la única gestionable, pues puede ser planificada, manejada y generada.

INFOR ha establecido que el uso de la biomasa forestal para la generación de energía debe ser reconocida y valorada por la sociedad chilena, como una fuente de energía renovable, con múltiples beneficios sociales, económicos y ambientales. Complementariamente, el Ministerio de Agricultura en su Política Forestal, expresa que se debe consolidar la contribución del sector forestal a la seguridad e independencia energética y descarbonización de la matriz de energía primaria, incrementando la producción y utilización de biomasa forestal. Estos enunciados se alinean también con la Política Energética 2050, definida por el Ministerio de Energía, donde destaca y fomenta el uso más intensivo de energías renovables.

En Chile la participación de la biomasa en la matriz energética primaria según el Ministerio de Energía alcanza cerca del 25%, siendo superada solo por los combustibles derivados del petróleo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Balance Nacional de Energía Primaria.

Fuente de Energía	Participación (%)
Petróleo crudo	26,2
Biomasa	24,7
Carbón	20,8
Gas natural	17,5
Hídrica	6,1
Solar	2,2
Eólica	1,6
Biogás	0,6
Geotérmica	0,3
Total	100,0

(Fuente: Ministerio de Energía, 2022)

En este trabajo INFOR pone a disposición información estratégica para el sector, a través de un programa de corto, mediano y largo plazo, que requiere de una permanente generación y análisis de información, de manera de proveer de antecedentes que apoyen el desarrollo y crecimiento del sector energético y forestal del país, identificando las principales brechas, opciones de mejora y aspectos normativo, entre otros, que permitan apoyar su crecimiento.

Uno de los productos energéticos que se pueden producir con la biomasa forestal es el pellet, biocombustible fabricado a partir de aserrín o virutas generados por la industria del aserrío, en la actualidad principalmente en base a biomasa de Pino radiata. Esta materia prima debe cumplir con características de calidad, referidos principalmente a su humedad, limpieza, origen, ausencia de aditivos y de corteza. La posibilidad de producir pellet a partir de la biomasa forestal es una oportunidad para dar uso a un subproducto generado por la industria del aserrío y remanufactura.

La industria del pellet ofrece al mercado un producto energético eficiente y que contribuye a la reducción de la contaminación ambiental atribuible al mal uso de la leña en varias ciudades del país. Este aporte contribuye, además, a diversificar la matriz energética nacional.

La industria del pellet es relativamente reciente, surgiendo en estos últimos años entre las regiones de Valparaíso y Aysén, evidenciado el aumento de la demanda de este biocombustible. El desarrollo del sector del pellet en el país ha sido creciente en los últimos años, derivado de programas de fomento al recambio del modelo de calefacción y cambios culturales en el consumidor final, lo que se refleja en el aumento de las tasas de producción y venta anual de este producto. Este crecimiento se basa, además, en la disponibilidad de biomasa forestal, para ser usada como materia prima por parte de la industria del pellet.

El abastecimiento seguro de la materia prima requerida es la base para mantener o aumentar las tasas de producción de pellet. El abastecimiento de materia prima es una de las etapas más sensibles del proceso de producción de pellet, dado que en la actualidad existe una completa dependencia con el desarrollo productivo de la industria del aserrío, único abastecedor de la industria de este energético. Por lo mismo, cualquier disminución en la disponibilidad de subproductos del aserrío, afecta la producción de este biocombustible.

La estrecha dependencia del sector del pellet y del abastecimiento de biomasa forestal, es una de las temáticas de importancia que debe ser monitoreada, ya que de existir una baja en la actividad del aserrío implica consecuencias en la disponibilidad de materia prima para el pellet, sector que por el contrario está demostrando un crecimiento anual de manera constante en los últimos años, y que para poder responder a ella, depende de la biomasa forestal que proviene de la industria del aserrío. Por esta razón, se ha realizado un trabajo de recopilación de información relacionada con las fuentes de biomasa generadas por el sector del aserrío que podrían ser utilizadas por la industria del pellet, de manera de conocer los volúmenes disponibles, su origen y posibles destinos de ella, entre otros.

Este trabajo se enmarca, en el programa de INFOR "Fortalecimiento y desarrollo de opciones forestales para el uso de la biomasa de bosques en la generación de energía a nivel país", Línea de I+D Biomasa Forestal y Energía, que plantea la generación de información que responda a una demanda permanente de los actores relacionados al uso de la biomasa forestal para la generación de energía renovable, con el objetivo de apoyar el desarrollo y diversificación de la matriz energética nacional, aportando a la construcción de políticas públicas y desarrollos silvícolas y tecnológicos requeridos para los diferentes sectores involucrados.

La fuente de información utilizada en este estudio, corresponde a los informes técnicos generados por el Área de Estudios Económicos de INFOR (disponibles en la biblioteca institucional) e información generada por proyectos específicos sobre esta materia, que actualmente se encuentran en desarrollo. Su objetivo es generar información relevante que permita determinar el estado actual de la biomasa forestal disponible, con potencial utilización en la producción de pellet para su uso como energía, de manera de apoyar los procesos de toma de decisiones por parte de los distintos actores involucrados en esta temática.

METODOLOGÍA

Se recopiló información relacionada con el uso de la biomasa forestal para su utilización en energía, dirigiendo la búsqueda de antecedentes hacia la producción regional de subproductos de la industria primaria del aserrío entre las regiones del Maule a la Araucanía. Se utilizaron documentos disponibles desde la biblioteca institucional de INFOR, accesible desde www.infor.cl.

RESULTADOS

La Industria del Pellet en Chile

La industria del pellet ha presentado un crecimiento constante los últimos años, con tasas superiores al 20% anual, siendo una opción de reemplazo en el uso de la leña o combustibles fósiles, por ser un producto energético de alta eficiencia térmica y por emitir menores emisiones contaminantes al medio ambiente. Se debe reconocer que, el reemplazo en el uso de la leña, fue propiciado por el Programa de Recambio de estufas a leña por otros tipos de calefactores llevado adelante por el Ministerio de Medio Ambiente, en donde en general, las estadísticas destacan una preferencia mayoritaria por equipos que utilizan pellet, el cual es considerado un energético más limpio y eficiente.

Este Programa de Recambio de Calefactores es parte de la implementación de los Programas de Descontaminación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, así como también, a los cambios culturales en el consumidor final, que privilegian la utilización de combustibles más limpios y de fácil y cómoda manipulación.

La principal fuente de abastecimiento de materia prima que se utiliza en el país para producir pellet son los subproductos de la industria del aserrío, los que durante el año 2020 alcanzaron los 5.224.182 m³ (Soto *et al.*, 2021). De este total se estima de un potencial que se comercializa en el país de 3,3 millones de metros cúbicos por año, constituidas por aserrín y viruta (Pinilla *et al.*, 2020; Soto *et al.*, 2021).

Estos subproductos son utilizados también por la industria de generación, la cual dependiendo del mercado de la generación de energía eléctrica puede aumentar su producción y con ello, su consumo de biomasa, afectando con su ello su disponibilidad para la industria del pellet. Otros usuarios de estos subproductos corresponden a la de tableros y la crianza de animales, entre otros, lo cual demuestra la alta competencia que existe por la utilización de esta biomasa.

Desde sus inicios el número de empresas productoras de pellet ha sido variable, existiendo a marzo del año 2021, 23 empresas productoras en funcionamiento, distribuidas entre las regiones de Valparaíso y Aysén. La distribución de las plantas productoras de pellet se presenta en Cuadro 2.

Cuadro 2. Número de empresas productoras de pellet en Chile según región

Región	N° Empresas	Porcentaje
Metropolitana	2	8,7%
Valparaíso	1	4,3%
Maule	4	17,4%
Biobío	8	34,8%
Araucanía	5	21,7%
Los Lagos	1	4,3%
Aysén	1	4,3%
Magallanes	1	4,3%
Total	23	100,0%

(Fuente: Pinilla & Luengo, 2021)

Las plantas productoras de pellet están presentes en varias regiones del país, sin embargo, el área conformada por las regiones de Maule, Biobío y La Araucanía, concentra al año 2021 la mayor cantidad de ellas, con un total de 17 plantas, que corresponden al 74% del total. Esta concentración está estrechamente relacionada con la actividad forestal y la existencia de una alta cantidad de empresas del aserrío y plantas de remanufactura, quienes son los ofertantes de la materia prima que se utiliza para la fabricación de pellet.

A partir de información recopilada por INFOR, basada en antecedentes de producción aportados directamente por la industria del pellet, es posible conocer la producción de pellet en los años 2019 y 2020 y la proyección para el año 2021, lo que se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Producción de pellet según región y año

Región	Producción (Ton/año)		
	2019	2020	2021 (Estimación)
Metropolitana	500	300	500
Valparaíso	290	780	1700
Maule	7500	12800	42800
Biobío	93.433	140.809	229.122
Araucanía	21.861	22.500	27.600
Los Lagos	3.700	4.600	3.800
Aysén	0	153	10.000
Magallanes	1.893	1.444	2.400
Total	129.177	183.386	317.922

(Fuente: Pinilla & Luengo, 2021)

Se observa el constante crecimiento que ha tenido la producción de pellet en los últimos años, donde el año 2020 alcanzó a las 183.286 t/año, con un aumento cercano al 42% con respecto al año anterior. Según las proyecciones de las empresas para el año 2021 la producción de pellet continuará en aumento.

De la información anterior es posible señalar que el año 2020, el 96% de la producción total de pellet se concentró entre las regiones del Maule a La Araucanía, y que la Región del Biobío representó el 74% de la producción total de pellet durante el mismo año.

Relación Subproductos del Aserrío y Producción de Pellet

Contar con abastecimiento seguro de materia prima es la base de la industria de pellet, producto cuya demanda presenta un crecimiento constante. La producción de pellet presenta una completa dependencia de la industria del aserrío, actualmente la única abastecedora de materia prima, siendo sensible respecto de su comportamiento. Cualquier disminución en disponibilidad de subproductos del aserrío, afecta la producción de este biocombustible.

Tal dependencia significa una debilidad importante para la industria del pellet, afecta el abastecimiento de materia prima y genera escenarios de incertidumbre derivados de períodos de menor disponibilidad de subproductos desde la industria del aserrío. Constituye también un factor clave que posibilita o impide la concreción de nuevos emprendimientos en este sector, así como el crecimiento de las empresas productoras de pellet actualmente existentes.

La menor disponibilidad de materia prima puede originarse por diferentes factores, entre ellos: (i) fluctuaciones de las tasas de producción de la industria del aserrío; (ii) factores de mercado atribuible a la menor demanda de madera; y (iii) presencia de mercados competidores para la biomasa. Estos factores pueden afectar la seguridad de abastecimiento de materia prima para la industria pelletera y algunos de ellos ya sean manifestado en la industria nacional durante los últimos años.

En el escenario recién descrito, se requiere de un monitoreo constante de la disponibilidad de materia prima y del desarrollo del mercado del pellet en general, ya sea de los vectores de oferta y especialmente, de la demanda por este energético,

- Disponibilidad de Biomasa Forestal para la Industria del Pellet

El consumo de trozas de la industria del aserrío durante el año 2020 generó 7,8 millones de m³ de madera aserrada, de los cuales el 40% (3,2 millones de m³), se produjeron en la región del Biobío (Soto *et al.*, 2021). Como subproductos de la industria del aserrío y remanufactura a nivel nacional se generaron cerca de 5,2 millones de metros cúbicos, de los cuales 2,9 millones corresponden a aserrín primario (Cuadro 4), (Soto *et al.*, 2021). El aporte de la región del Biobío al volumen total de subproductos alcanza al el 36% (1.892.832 m³) (Pinilla *et al.*, 2022).

Cuadro 4. Volumen de subproductos madereros a nivel nacional (año 2020).

Subproducto	Total (m ³)
Corteza	1.230.449
Lampazos	538.059
Aserrín primario	2.872.991
Aserrín secundario	166.338
Viruta	272.072
Despunte	144.272
Total	5.224.182

(Fuente: Gysling & Bañados, 2021)

Del volumen total de subproductos, una parte de ellos se destina al autoconsumo en los propios aserraderos, sea para generación eléctrica o producción de vapor para sus propios procesos productivos, y otro porcentaje importante se comercializa para ser utilizados por diversas industrias, entre las que destaca la industria del pellet.

Considerando que la región del Biobío genera el 40% de la madera aserrada del país, es la región que produce la mayor cantidad de subproductos de la industria del aserrío, potencialmente utilizable como materia prima por la industria del pellet, tanto en esta región como en las vecinas, debido a los desplazamientos de biomasa hacia otras regiones.

En la producción de pellet se utiliza principalmente aserrín y viruta, los que quedan disponibles luego de la transformación primaria de trozas en madera aserrada o de la transformación secundaria en productos elaborados o remanufacturados. Este material contiene un alto contenido de humedad, por lo que para ser utilizado por la industria del pellet debe considerar procesos de secado previo.

La industria pelletera utiliza también los subproductos de la industria de la remanufactura, viruta y aserrín secundario, que el año 2020 alcanzó los 438.411 m³, lo que representó un 8,4% del total de subproductos generados (Soto *et al.*, 2021). Este tipo de materia prima presenta un bajo contenido de humedad, lo que la hace de mucho interés para la industria del pellet, pues no necesita un proceso de secado previo a la fabricación del producto.

Considerando exclusivamente la cantidad de materia prima o subproductos con potencial de uso por parte de industria del pellet (aserrín primario, viruta y aserrín secundario), estos alcanzaron los 3,3 millones de metros cúbicos durante el año 2020 (Soto *et al.*, 2021).

Según la información recopilada, los subproductos generados por la industria del aserrío tienen distintos destinos, como: comercialización, autoconsumo para los propios procesos de la industria, ser regalado o acumulado (Cuadro 5).

Cuadro 5. Volumen de subproductos madereros según tipo y destino 2020 a nivel nacional (m³)

Subproducto	Total (m ³)	Comercializa (m ³)	Autoconsumo (m ³)	Regala (m ³)	Acumula (m ³)
Corteza	1.230.449	910.935	304.072	2.761	12.681
Lampazos	538.059	482.165	30.279	9.574	16.040
Aserrín primario	2.872.991	1.890.653	921.312	29.054	31.972
Aserrín secundario	166.338	103.528	59.329	1.744	1.737
Viruta	272.072	133.511	135.460	2.060	1.042
SubTotal	3.311.401	2.127.692	1.116.101	32.858	34.751
Despunte	144.272	64.813	75.474	3.651	334
Total	5.224.182	3.585.605	1.525.927	48.845	63.806

(Fuente: Gysling & Bañados, 2021).

Del Cuadro 5 se desprende que 2.127.692 m³, 59% del total de subproductos que se comercializa, puede tener como destino la producción de pellet (aserrín primario, aserrín secundario y viruta que se comercializan). En la actualidad se desconoce el porcentaje de consumo por parte de la industria del pellet, o que demuestra la necesidad de profundizar en este análisis.



Figura 1. Materia prima utilizada para la producción de pellet.

A este análisis de disponibilidad, se le puede agregar un porcentaje de los subproductos que actualmente están siendo consumidos por los propios aserraderos para la generación de energía que requieren para sus propios procesos productivos, un total de 1.116.101 m³, con potencial de uso por la industria del pellet (aserrín primario, aserrín secundario, viruta). Este nivel de autoconsumo, demuestra que existe una demanda por estos subproductos capturada por parte de los aserraderos, lo que disminuye la oferta de materia prima para abastecer a la industria del pellet. Lo anterior hace necesario un análisis para evaluar la disponibilidad de un volumen potencial que pudiese ser destinado a la industria del pellet.

Es importante destacar que, del total de empresas productoras de pellet identificadas, 14 de ellas, están asociadas a un aserradero por lo que cuentan con un porcentaje de abastecimiento asegurado. Sin embargo, el aumento de la demanda por pellet ha generado que estas mismas plantas deben complementar su abastecimiento de materia prima desde terceros.

Considerando que los subproductos del aserrío provienen directamente de la producción de madera aserrada, es interesante analizar la evolución de la industria del aserrío, así como el número de aserraderos en funcionamiento según año (Cuadro 6).

El número de aserraderos en funcionamiento presenta una tendencia a la baja en los últimos años, lo que está directamente relacionado con la disminución en la tasa de producción de madera de aserrada y subproductos madereros.

Por su parte, la producción de madera aserrada también ha mostrado una tendencia a la baja, aunque se ha presentado constante en los últimos años. Considerando que la producción de pellet se ha incrementado, y se espera continúe así en los próximos años, se hace interesante monitorear constantemente la actividad del aserrío para proporcionar información estratégica de abastecimiento a la industria del pellet.

Cuadro 6. Evolución de la producción de madera aserrada, de subproductos y número de aserraderos en funcionamiento

Año	Madera aserrada (Miles de m ³)	Subproductos (Miles de m ³)	Aserraderos (N°)
2010	6.353,9	3.962,4	1.073
2011	6.784,7	4.011,2	1.018
2012	7.160,2	4.292,3	973
2013	7.720,7	4.710,5	940
2014	7.998,8	4.842,4	912
2015	8.372,2	5.286,4	1.090
2016	8.455,1	5.325,6	1.101
2017	8.150,9	5.047,0	1.056
2018	8.307,2	5.665,2	984
2019	8.030,4	5.242,2	957
2020	7.873,8	5.224,2	938

(Fuente: Gysling & Bañados, 2021).

El aumento en la de producción de pellet significa un aumento de la demanda por materia prima desde la industria del aserrío, y si está última no aumenta o presenta una disminución, es un riesgo para mantener los niveles de producción esperados de pellet. Ello se acrecienta al considerar que la industria del aserrío representa la única fuente de abastecimiento de la industria productora de pellet.

Adicionalmente, hay que considerar que la industria del aserrío está en permanente actualización y mejora de su eficiencia, como, por ejemplo, el tipo de sierra utilizada, lo que incide en el volumen de subproductos generados y disponibles para ser usado por la industria del pellet. La evolución anual de los volúmenes de subproductos generados por el aserrío, se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Producción de subproductos del aserrío utilizables por la industria del pellet (miles de m³).

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Corteza	1.052,5	1.111,1	1.212,6	1.260,1	1.319,2	1.322,8	1.283,6	1.320,9	1.250,5	1.230,4
Lampazos	606,5	625,9	589,0	560,2	770,3	703,6	671,6	646,3	578,5	538,1
Aserrín primario	1.970,2	2.187,9	2.429,0	2.592,3	2.760,3	2.843,1	2.601,9	3.129,0	2.841,4	2.873,0
Aserrín secundario	114,0	128,5	141,6	123,5	122,7	146,3	153,2	171,3	168,8	166,3
Viruta	205,7	209,5	259,0	197,5	204,0	254,4	248,8	268,7	268,1	272,1
SubTotal materia prima para pellet	2.290,0	2.525,9	2.829,7	2.913,3	3.087,0	3.243,9	3.003,9	3.569,0	3.278,4	3.311,4
Despunte	62,3	29,4	79,2	108,8	110,0	55,4	87,9	129,1	134,8	144,3
Total	4.011,2	4.292,3	4.710,5	4.842,4	5.286,4	5.325,6	5.047,0	5.665,2	5.242,2	5.224,2

(Fuente: Gysling & Bañados, 2021).

La información anterior, deja de manifiesto las variaciones en la tasa de producción de subproductos en la última década. El volumen de subproductos generados el año 2019 alcanzó los 5.242.222 m³, valor inferior al volumen producido el año anterior (5.665.239 m³), mientras que el año 2020 este valor llegó a 5.224.182 m³. La disminución en la generación de subproductos durante los últimos años, representa una preocupación para la industria pelletera, debido al aumento de la demanda por pellet, que se traduce en un aumento de la demanda por subproductos del aserrío.

Del volumen de subproductos con potencial para producción de pellet (aserrín primario, secundario y virutas) el mayor porcentaje de ellos corresponde aserrín primario, el que durante el año 2019 presentó

una baja considerable con respecto al año anterior, y que se mantuvo durante el año 2020. Lo anterior repercute de manera importante en la disponibilidad de estos productos como materia prima para la producción de pellet, dado que el aserrín primario para el año 2020 represento el 86% de total de subproductos que estuvo disponible en el país.

Una primera estimación de la disponibilidad de materia prima para abastecer la industria del pellet, consideró los volúmenes de los tres tipos de subproductos que se comercializan (Aserrín primario, aserrín secundario y viruta), los cuales actualmente son la única fuente de materia prima, y consideró también las tasas de producción de pellet a partir de los volúmenes anuales catastrados por INFOR de manera directa con las empresas productoras (Cuadro 8).

Cuadro 8. Producción o disponibilidad de subproductos del aserrío, comercializable, utilizables por la industria del pellet y producción.

Ítem	2018	2019	2020
Disponibilidad de Materia Prima potencial para Pellet (m ³)	2.231.960	1.970.899	2.127.692
Producción Pellet (t)	90.000	129.177	183.386

(Fuente: Gysling & Bañados, 2021; Pinilla & Luengo, 2021)

El año 2020 hubo una disponibilidad de 2.127.692 m³ de materia prima potencial para pellet (Aserrín primario, Aserrín secundario y Viruta), que equivale al 59% del total de subproductos que se comercializa a nivel nacional (Cuadro 5), tanto para la industria pelletera como para otras que también los demandan. Sin embargo, se desconoce el porcentaje de consumo real por parte de cada una de las industrias demandantes, lo que hace necesario el profundizar los estudios en esta temática.

La demanda de materia prima por parte de la industria del pellet ha aumentado y se espera que continúe en alza. La industria requiere conocer con anticipación la oferta de materia prima que permita responder a la creciente demanda por pellet, particularmente el consumo real por parte de esta industria, y cuanto de la oferta de materia prima es capturada por la industria competidora.

Un porcentaje del volumen de subproductos lo autoconsume la misma industria del aserrío que los genera, lo que afecta la disponibilidad de para la industria del pellet y le crea una situación de incertidumbre respecto a su abastecimiento de materia prima.

No existe información para estimar la demanda de subproductos por parte de la industria del pellet, pero se puede estimar en forma simple asumiendo un consumo promedio de 9 m³ de subproductos para producir 1 tonelada de pellet, y usando los volúmenes de subproductos del aserrío que se genera en las unidades de producción de madera aserrada, particularmente los volúmenes que destinan a comercialización. (Cuadro 9).

Cuadro 9. Estimación de producción potencial de pellet de acuerdo a disponibilidad de subproductos del aserrío

Ítem	Años		
	2018	2019	2020
^[1] Materia Prima potencialmente disponible para Pellet (m ³), subproductos comercializable	1.831.692	1.970.899	2.127.692
^[2] Producción Pellet (t)(*)	90.000	129.177	183.386
^[3] Materia prima consumida para pellet (m ³)	810.000	1.162.593	1.650.474
^[4] Porcentaje materia prima consumida ^[3] respecto a materia prima total ^[1]	44,2%	59,0%	77,57%
^[5] Excedente anual de materia prima ^{[1]-[3]} (m ³)	1.021.692	808.360	477.218

(*) (Fuente: elaboración propia a partir de Pinilla et al., 2022).

El cuadro anterior indica que la producción de pellet ha ido en aumento en los últimos años, requiriendo de una mayor cantidad de abastecimiento de biomasa para cumplir con la creciente demanda por este producto. El año 2019 la industria del pellet consumió cerca del 59% (1.162.593 m³) de los tres subproductos comercializados y que están siendo utilizados por dicha industria. El año 2020 el consumo creció respecto del año anterior, alcanzando cerca del 77.5% (1.650.474 m³), quedando disponible para las otras industrias demandantes un pequeño volumen que fluctúa cerca de los 477.218 m³.

- Análisis Según Macrozona del Maule a La Araucanía

La macrozona del Maule a la Araucanía presenta la mayor cantidad de aserraderos, concentrando la actividad industrial del aserrío y donde se encuentra la mayor cantidad de empresas productoras de pellet. El potencial de producción de pellet a partir de los subproductos del aserrío en cada una de estas regiones, asumiendo los mismos supuestos previos, se detalla en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Producción de pellet y consumo materia prima Región del Maule a La Araucanía.

Región	Producción (t/año)		
	2019	2020	2021 (Proyección)
Maule	7.500	12.800	42.800
Biobío	93.433	140.809	229.122
Araucanía	21.861	22.500	27.600
Total Producción de pellet Macrozona	122.794	176.109	299.522
Consumo materia Prima Macrozona (m ³)	1.105.146	1.584.981	2.695.698
Incremento respecto año anterior (m ³)		479.835	1.110.717

(Fuente: elaborado a partir de Pinilla & Luengo, 2021).

En la macrozona de Maule a La Araucanía se concentra cerca del 75% de la producción de pellet del país, la que ha sido creciente en los últimos años, y estaría requiriendo del abastecimiento de biomasa regional e interregional. Cada región podría abastecer de materia prima desde regiones vecinas, en función de determinados radios de abastecimiento que no afecten significativamente los costos de producción del pellet.

La estrecha relación entre la industria maderera y productora de pellet, significa que esta última tiene un límite que está dado por la oferta de subproductos apropiados para pellet proveniente de la industria del aserrío, aproximadamente 2 millones de metros cúbicos, asumiendo que el año 2021 se han mantenido los volúmenes producidos durante el año 2020. Esto confirma que cualquier variación en la actividad de la industria de aserrío repercute en la capacidad de producir pellet a nivel nacional.

Los subproductos utilizados por la industria del pellet también cuentan con demanda desde otros sectores, entre ellos las calderas de generación eléctrica/térmica y la industria de tableros, lo que aumenta la presión por los subproductos del aserrío, y consecuentemente el precio de los mismos.

Escenarios Futuros

Los escenarios actuales de oferta y demanda de biomasa para la producción de pellet pueden presentar variaciones dependiendo del comportamiento de la industria del aserrío. Ello derivado de la estrecha dependencia entre ambas industrias, ya que casi la totalidad del pellet producido en Chile proviene de subproductos en base a pino radiata, la principal especie utilizada por el sector del aserrío.

Esta dependencia, unida a la demanda creciente por pellet en el país, sugiere diseñar mecanismos de monitoreo de la actividad del aserrío, y de medidas preventivas para enfrentar períodos de menor actividad derivado de factores estacionales o de una menor demanda de madera en el país. También, es

necesario monitorear la demanda de subproductos del aserrío por parte de los principales competidores de la industria del pellet.

Un aspecto a considerar es el monitoreo del mercado del pellet según región y la necesaria comunicación y coordinación entre los productores que permita solucionar eventuales períodos de escasez o desabastecimiento en algunas ciudades, lo que implica el movimiento de flujos de pellet entre regiones.

La vulnerabilidad estratégica del pellet respecto de la actividad de la industria del aserrío, hace necesario analizar cambios en el modelo productivo, con el objetivo de disminuir esta dependencia. Entre las opciones se considera la factibilidad técnica y económica de utilizar la biomasa obtenida desde trozas y el establecimiento de plantaciones forestales con fines energéticos que permitan en un futuro generar y satisfacer la demanda por biomasa de la industria productora de pellet, y así no depender de los vaivenes de la industria del aserrío.

La utilización de otras especies forestales, distintas a pino radiata, requiere de considerar distintos factores antes de su uso, entre ellos: que sean especies con probada presencia en los territorios, con crecimiento y adaptación a las regiones que demandan la materia prima, que sea factible la producción de pellet de calidad, y especialmente, que exista una superficie suficiente que permita el abastecimiento permanente y seguro en cantidad y calidad. Para ello se requiere información confiable y oportuna, que permita conocer y cuantificar la biomasa forestal disponible y su calidad para fabricar pellet, su ubicación y disponibilidad, así como también investigación para incrementar y diversificar los volúmenes de materia prima demandada por la industria del pellet. Disponer de esta información condicionará las opciones para su utilización en la producción de pellet, aspecto que debe ser apoyado con estudios tecnológicos que entreguen información a escala comercial, para identificar nuevas fuentes de abastecimiento de materia prima proveniente de nuevas especies forestales.

Pinilla *et al.*, 2022, mencionan estudios nacionales en los que se han utilizado especies nativas y/o mezclas de rastrojos de la actividad agrícola, señalándose como la mezcla de residuos más promisoría aquella constituida por el rastrojo de trigo pre tratado y madera, aun cuando presenta valores excedidos en emisión de gases, lo que amerita su re-estudio en el futuro (Baettig, 2018). En la misma línea, Pelz & Steinbrink (2010) estudiaron diversas especies en la región de Los Ríos para producir pellet, concluyendo que algunas son adecuadas para el uso energético, pero que su pelletización es más exigente que la de las coníferas que se están utilizando actualmente. Estos últimos autores sugieren que se requiere investigar la combinación de distintas especies de madera para la producción de pellet, agregando entre otros temas la necesidad de generar y transferir conocimiento y tecnología para el proceso productivo del pellet, en aspectos como el astillado, secado, molido y tamizado. Pegoretti (2021) indica que especies como *Paulownia* y *Miscanthus* presentan un buen potencial energético para la fabricación de pellet y la producción de energía térmica en la región del Biobío, aunque reconocen que estas especies presentan menor capacidad para bioenergía en comparación con el pino radiata. Finalmente destaca que hay que asegurar la buena calidad del biocombustible a generar y su capacidad para cumplir con las normas nacionales e internacionales que le son aplicables.

Aunque se pueda producir pellet a partir de la biomasa de una especie forestal en específico, si no se cuenta con una superficie plantada adecuada, no sería posible su utilización, pues no se dispondría de un abastecimiento constante y seguro de biomasa a partir de esa especie.

El actual proceso de producción de pellet se inicia con la disponibilidad de aserrín o viruta. Esta biomasa proviene ya sea desde aserraderos asociados a las plantas de pellet, o bien debe ser adquirida en el mercado desde aserraderos externos. En otros países, las empresas de pellet inician su proceso directamente en el bosque, donde se va a terreno a buscar trozas incorporando procesos de transporte, descortezado y astillado, previo a la producción de pellet. Este modelo deberá ser analizado según estructuras de costos de cada empresa, el valor de la biomasa desde aserraderos y el valor del pellet en el mercado. Esta opción de generación de biomasa implicaría para las empresas productoras un cambio en el proceso productivo e inversión para incorporar la infraestructura y equipos que se requieren para dicho fin.

Este cambio de la estructura de costos debe ser analizado por los productores de pellet, quienes deberían modificar sus márgenes o precios de venta, o analizar opciones de asociatividad que les permitan abordar de mejor forma estos potenciales escenarios de abastecimiento.

Los análisis de sensibilidad o de riesgos de desabastecimiento deben considerar diversos factores, basados todos ellos en que el mercado del pellet seguirá creciendo en el país. Ello implica el análisis de nuevas opciones de abastecimiento a partir de diferentes especies forestales, cambios tecnológicos del modelo de abastecimiento y producción, considerando extraer la materia prima desde el bosque, incorporando faenas de trozado, descortezado, triturado y secado de la biomasa, para que este quede disponible para la producción de pellet. Estas opciones tecnológicas implican desarrollar estudios que permitan determinar la factibilidad técnica y económica para ser considerada como una opción de abastecimiento posible de utilizar en un futuro, y de los apoyos requeridos para su implementación.

Respecto del secado de la biomasa, este es un factor importante en la industria del pellet, ya que para su producción se requiere de material seco, el que en general no está disponible, o si lo está, es en una mínima cantidad. Los procesos de secado son fundamentales para poder optar a la biomasa que actualmente está disponible, que corresponde a materia prima con un alto contenido de humedad, lo que será aún más importante y necesario si se obtiene la biomasa desde el bosque.

Considerando que la industria pelletera en la actualidad utiliza mayoritariamente biomasa de pino radiata, y que además en el país no se establecen plantaciones para la generación de biomasa para energía, es necesario abordar otros caminos para diversificar y aumentar la disponibilidad para la industria del pellet. Por esta razón y dado que las proyecciones indican que el consumo de pellet continuará en aumento, es necesario realizar un monitoreo permanente de la producción, y especialmente, de la disponibilidad de abastecimiento de materia prima para este biocombustible, de manera de conocer de forma específica los volúmenes con potencial de ser comercializado a la industria de pellet, y dimensionar el nivel que tienen las otras industrias que actualmente compiten por dicha biomasa.

El incremento en la producción de pellet tiene un límite según sea la cantidad de subproductos de calidad posibles de utilizar por esta industria. Lo anterior confirma que, hoy en día, la industria del pellet está peligrosamente enfrentada a depender únicamente de la materia prima que le proporciona la industria del aserrío, por lo que será necesario abordar nuevas fuentes de abastecimiento.

CONCLUSIONES

La principal fuente de abastecimiento para la industria del pellet es la industria del aserrío y de la remanufactura, las que generan una cantidad de subproductos que son requeridos para la fabricación de pellet. El uso de estos subproductos en energía, favorece los procesos que buscan diversificar la matriz energética, su descarbonización y fomentar la utilización de energías renovables, siendo una oportunidad para aprovechar el potencial forestal del país.

La fabricación y consumo de pellet es una opción que valoriza los subproductos de la actividad forestal, aportando a la generación de riqueza a nivel local y a la diversificación de la matriz energética del país, propiciando una relación directa con la industria forestal, donde ambos sectores son beneficiados.

Según las proyecciones de las empresas para el año 2021 la producción de pellet continuará en aumento. La Macrozona Maule a La Araucanía, donde se ubica la principal actividad del aserrío en base a pino radiata, concentra cerca del 75% de la producción de pellet del país, área. Del total de los subproductos generados en esta macrozona, el 57% corresponde a aserrín primario, seguido de la corteza con un 25%. En el caso del aserrín, los mayores volúmenes producidos corresponden a aserrín verde (húmedo). Un mínimo porcentaje de este se encuentra en un estado seco y es posible conseguirlo de la industria de la remanufactura. Estos subproductos también son demandados por los centros de generación eléctrica, industria del tablero, e incluso, planteles de crianza, siendo competidores para la industria del pellet.

La estrecha dependencia entre la industria del pellet y la del aserrío, en algunas situaciones puede ser un factor de riesgo, por lo que se requiere del seguimiento, cuantificación y monitoreo permanente de la actividad del aserrío para prevenir situaciones de desabastecimiento. Dado que los escenarios de consumo del pellet señalan que aumentará la demanda en forma constante en los próximos años, se requerirá de una mayor cantidad de biomasa de calidad adecuada para el funcionamiento de las plantas que produzcan la cantidad de pellet que se demande.

Debido a la necesidad de asegurar un suministro de biomasa en calidad y cantidad para el funcionamiento de las plantas de pellet, se requiere aumentar la oferta y disponibilidad de los subproductos generados por la industria del aserrío y remanufactura, principalmente viruta y aserrín de pino radiata, o de otras especies. Se requiere también, desarrollar investigación y opciones tecnológicas, para aumentar la oferta de materia prima demandada por la industria pelletera.

Es indudable que la estrecha relación entre la industria maderera y productora de pellet, significa que esta última tiene un límite que está dado por la oferta de biomasa de subproductos proveniente de la industria del aserrío, y que se pueden utilizar en esta industria. Por consiguiente, se debe evaluar la incorporación de nuevas opciones de abastecimiento, que consideren nuevos tipos de materia prima, proveniente de otras especies forestales; y desarrollar innovación en los procesos productivos, para generar la biomasa que la industria del pellet requiere, y que permitan disminuir la dependencia con la industria del aserrío.

REFERENCIAS

- Baettig, R. (2018).** Innovación en biocombustibles sólidos densificados de origen agrícola para consumidores domiciliarios urbanos e industriales. Informe final de proyecto. Descripción de biocombustibles sólidos densificados elaborados en el proyecto FIC Región del Maule. 2018. Universidad de Talca. Talca, Chile. <http://ficbiomasas.otalca.cl/>
- Gysling, J. & Bañados, J.C. (2021).** Subproductos madereros de la industria del aserrío 2021. Boletín Estadístico N° 181. Instituto Forestal. Santiago. 86 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31300>
- Ministerio de Energía. (2022).** Balance nacional de energía. En: Energía abierta, una iniciativa de la Comisión Nacional de Energía <http://energiaabierta.cl/categorias-estadistica/balance-energetico/>. Consulta: junio, 2022.
- Pegoretti, H. (2021).** Evaluación de las propiedades de diferentes especies con potenciales energéticos para la elaboración de pellet de calidad. Congreso Online Internacional Florestal, CONIFLOR. Mayo, 2021.
- Pelz, S. & Steinbrink, J. (2010).** Análisis de materias primas y combustibles sólidos de madera (CSM). Universidad de Rottenburg. Departamento SENCE-Dendroenergía. Seminario Internacional del proyecto FIA. Marzo 2010.
- Pinilla, J.C., Luengo, K., Navarrete, M. & Navarrete, F. (2020).** Estudio del Pellet en base a especies forestales que crecen en la Región del Biobío. Instituto Forestal. Informe Técnico N° 241. Concepción, Chile. 60 p.
- Pinilla, J.C. & Luengo, K. (2021).** Antecedentes Descriptivos de la Producción y Mercado del Pellet en Chile. Instituto Forestal. Documento de Divulgación N° 55. Concepción, Chile. 33p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31337>
- Pinilla, J.C., Luengo, K., Navarrete, M. & Navarrete, F. (2022).** Antecedentes de abastecimiento de biomasa con fines energéticos. Proyecto Mejoramiento del Entorno y Reducción de Brechas Tecnológicas para la Producción y Desarrollo del Mercado del Pellet en Chile. Instituto Forestal. Informe de Proyecto CORFO / FIC - 2017 18BPE-93859. Concepción, Chile. 53p.
- Soto, D., Gysling, J., Kahler, C., Poblete, P., Álvarez, V., Pardo, E., Bañados, J.C. & Baeza, D. (2021).** Anuario Forestal 2021. Instituto Forestal. Boletín Estadístico N° 180. Santiago. 257p.

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL

