

Volumen 30 N° 1. Abril, 2024

ISSN 0718-4646



# CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



**INSTITUTO FORESTAL  
CHILE**







## **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](mailto:sbarros@infor.cl) [bgutierrez@infor.cl](mailto:bgutierrez@infor.cl)





## CONTENIDO

### ARTÍCULOS

**Aplicación de fluorescencia de clorofila para evaluar desempeño de plantas de hualo en ensayos de terreno.** 5

Iván Quiroz Marchant & Braulio Gutiérrez Caro.

**Esquemas de Manejo para el Cultivo de Pino Piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile.** 17

Verónica Loewe Muñoz & Claudia Delard Rodríguez.

**Migración Asistida de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch. Un Modelo para Salvaguardar el Potencial Adaptativo de una Especie Emblemática de los Bosques de Chile.** 29

Roberto Ipinza Carmona; Jorge González Campos; María Molina Brand; Braulio Gutiérrez Caro; Hernán Soto Guevara; Laura Koch Zúñiga; Rodrigo Hasbún Zaror; Fernando Santibáñez Quezada; Lilian Saavedra Paillao; Carlos Magni Díaz; Juan Celhay Schoelermann & Santiago Barros Asenjo.

**Turberas y cosecha de *Sphagnum* en la región de Aysén, Chile.** 43

Jaime Salinas Sanhueza; Greta Gaudig; Matthias Krebs; Iván Moya Navarro & Fernán Silva Labbé.

### APUNTES

**Las Salicáceas como opción bioenergética para la Patagonia Aysenina.** 65

Juan Pinilla Suárez; Xiomara Gelvez Pelaez.; Jaime Salinas Sanhueza & Bernardo Acuña Aroca.

**Ficha técnica para plantación de *Araucaria araucana*.** 83

María Molina Brand; Hernán Soto Guevara; Roberto Ipinza Carmona & Marlene González González.





---

ARTÍCULO

## Aplicación de fluorescencia de clorofila para evaluar desempeño de plantas de hualo en ensayos de terreno.

Iván Quiroz Marchant<sup>1</sup> & Braulio Gutiérrez Caro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, sede Biobío. [bgutierr@infor.cl](mailto:bgutierr@infor.cl); [iquiroz@infor.cl](mailto:iquiroz@infor.cl)

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.603>

Recibido: 02.03.2024; Aceptado 22.04.2024

---

### RESUMEN

Se evalúa dos experiencias de plantación de hualo (*Nothofagus glauca*), una donde se contrasta plantas establecida con y sin cobertura de dosel remanente, y otra en que se evalúa el efecto de subsolado. Ambas experiencias se analizan con el objeto de confirmar la utilidad de las mediciones de fluorescencia de clorofila (expresada en el parámetro Fv/Fm) como indicador de estrés, que contribuya a explicar resultados de crecimiento, vigor y supervivencia de las plantas.

Los resultados mostraron que las plantas sin cobertura presentaron menores niveles de estrés y mayor vigor en comparación con las que estaban bajo cobertura. En cuanto al subsolado, las plantas en suelo subsolado mostraron mejor desempeño en términos de supervivencia, crecimiento en altura y diámetro de cuello, y menores niveles de estrés.

La fluorescencia de clorofila, utilizada como indicador de estrés, demostró ser consistente con las observaciones de vigor en terreno y con el desempeño general de las plantas.

**Palabras clave:** *Nothofagus glauca*, plantación, fluorescencia clorofila, estrés, vigor, crecimiento.

### SUMMARY

Two planting experiments of hualo (*Nothofagus glauca*) were evaluated: one comparing plants established with and without remnant canopy cover, and another assessing the effect of subsoiling. Both experiments were analyzed to confirm the utility of chlorophyll fluorescence measurements (expressed as the Fv/Fm parameter) as an indicator of stress, which helps explain the results related to plant growth, vigor, and survival.

The results showed that plants without canopy cover exhibited lower levels of stress and higher vigor compared to those under canopy cover. Regarding subsoiling, plants in subsoiled soil demonstrated better performance in terms of survival, height growth, neck diameter, and lower stress levels.

Chlorophyll fluorescence, used as a stress indicator, proved to be consistent with field observations of plant vigor and overall performance.

**Key words:** *Nothofagus glauca*, plantation, chlorophyll fluorescence, stress, vigor, growth.

---

## INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis es el proceso fundamental del metabolismo de las plantas, por lo mismo, analizar su funcionamiento reviste gran importancia en diferentes situaciones de interés práctico. Determinar la emisión de la fluorescencia de la clorofila constituye una forma precisa, confiable y rápida, de obtener información fisiológica que tiene múltiples aplicaciones (Gonzalez *et al.*, 2008; Salazar *et al.*, 2016).

La emisión de fluorescencia de los sistemas fotosintéticos cambia continuamente con el ambiente. Los estreses ambientales como temperaturas extremas, sequía, cambios en la intensidad lumínica, salinidad, y otros afectan la función de los sistemas fotosintéticos de las plantas, modificando la emisión de esta fluorescencia. Por lo mismo, el estudio de estos cambios se reconoce como una adecuada herramienta para obtener información acerca de la influencia del estrés sobre el estado fisiológico de las plantas; para estudiar factores que limitan la fotosíntesis; y los mecanismos de respuesta a estos tipos de estrés (Jimenez, 2015; Salazar *et al.*, 2016; Maxwell & Johnson, 2000; Rohacek *et al.*, 2008). Este método de análisis puede ser aplicable a las plantas o algas intactas *in situ* e *in vivo*, o a cloroplastos aislados, siendo, además, no invasivo, no destructivo, rápido y sensible (González *et al.*, 2008).

En efecto, la fluorescencia de la clorofila se ha utilizado para estudiar el estrés en diversidad de plantas de interés agrícola, y se ha utilizado también para evaluar técnicas de restauración forestal, mediante el análisis del vigor de las plantas establecidas con esa finalidad. El parámetro más estudiado es la razón entre la fluorescencia variable (Fv) y la fluorescencia máxima (Fm), denominado como Fv/Fm, que es proporcional a la máxima eficiencia fotoquímica primaria de las hojas (Demming *et al.*, 1992, cit. por Ceacero *et al.*, 2012) y puede utilizarse como un estimador del grado de estrés que las plantas están enfrentando en una condición determinada.

Particularmente, en ambientes mediterráneos las plantas deben hacer frente a diferentes tipos de estrés ambiental, entre los que destaca el estrés hídrico como el factor más limitante en el descenso de la tasa fotosintética, y que al reflejarse en la fluorescencia de la clorofila ha motivado diversos estudios que centran su interés en la sensibilidad de este parámetro frente a fenómenos de sequía y estrés hídrico.

El presente estudio hace uso del parámetro Fv/Fm para verificar su utilidad como indicador de estrés en plantaciones de hualo, relacionando este parámetro con variables de vigor y crecimiento de las plantas en condiciones contrastantes de cobertura (con y sin cobertura) y de preparación del suelo (con y sin subsolado), las que definen situaciones diferenciadas de estrés. El objetivo es verificar en qué medida las diferencias en el desempeño de las plantas se relaciona con la variación de la fluorescencia de clorofila expresada como el estimador de estrés Fv/Fm.

## MATERIAL Y MÉTODO

Se evalúa dos experiencias de plantación de hualo, una donde se contrasta plantas establecida con y sin cobertura de dosel remanente y otra en que se evalúa el efecto de subsolado. Ambas plantaciones fueron establecidas en el predio Hualos de Loanco. Este pertenece a Forestal Mininco y se emplaza a aproximadamente 20 Km al Sur de Constitución, en la provincia de Talca, Región del Maule. Se trata de un predio con presencia de remanentes del bosque maulino costero de la cordillera de la costa, insertos en áreas de plantaciones de pino radiata y que resultaron afectados por los incendios forestales del año 2017. Constituyen áreas de bosques mediterráneos de alto valor de conservación, donde la vegetación en los remanentes nativos es dominada por *Nothofagus glauca* (Hualo), pero incluyen también especies siempreverdes y del tipo esclerófilo.

### Efecto Cobertura

La plantación donde se contrasta niveles de cobertura fue establecida en julio de 2020, usando plantas 1:0 producidas en el vivero del Centro Tecnológico de la Planta Forestal en INFOR Concepción, a partir de semillas de la procedencia Empedrado, que resultan locales respecto del área plantada. La plantación propiamente tal se efectuó en casillas de 30x30x30 cm, usando pala plantadora.

La evaluación se realizó entre el segundo y tercer año de crecimiento de las plantas en terreno (28 a 34 meses), repitiéndola en tres temporadas: primavera (noviembre de 2022), verano (enero de 2023) y otoño (abril de 2023). En las tres ocasiones se consideró una situación con presencia de dosel superior de protección arbórea y otra donde las plantas crecían en terreno sin protección superior (**Figura 1**). Cada situación fue representada por tres núcleos de aproximadamente 10 plantas, las cuales fueron medidas en las tres temporadas

### Efecto Subsulado

Se evaluó el efecto de la preparación del sitio (Subsulado vs. Testigo sin subsolar) sobre el vigor y desarrollo inicial de una plantación experimental de hualo establecida el año 2020 en el mismo predio Hualos de Loanco. El suelo del ensayo, pertenece a la serie Constitución, corresponde a una terraza marina que ocupa una posición de lomajes en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, es un suelo profundo, de textura fina a muy fina, formado "in situ", y bien desarrollado. La evaluación se realizó en tres temporadas: primavera (noviembre de 2022), verano (enero de 2023) y otoño (abril de 2023). En las tres ocasiones se evaluó 6 hileras de 10 plantas, 3 de ellas establecidas en la línea de subsulado y las tres hileras restantes en las entrelineas sin subsolar (**Figura 2**).

### Evaluación

En ambas plantaciones (efecto cobertura y efecto subsulado) la medición de la fluorescencia de clorofila se realizó con un fluorómetro, equipo que permite obtener una serie de parámetros que describen los diferentes fenómenos que ocurren a nivel de los fotosistemas de las plantas. Se efectuó en una hoja por planta, previamente puesta en oscuridad por 30 minutos mediante una pinza específica para tal propósito (**Figura 3**). Se registró los valores de  $F_0$  (nivel mínimo de fluorescencia después que la hoja en oscuridad es expuesta a un rayo específico de luz emitido por el fluorómetro);  $F_m$  (nivel máximo de fluorescencia de la misma hoja, después de ser expuesta a pulsos cortos de luz actínica de alta densidad de flujo fotónico);  $F_v$  (fluorescencia variable, que corresponde la diferencia entre  $F_m$  y  $F_0$ ); y la relación  $F_v/F_m$  que es un buen indicador de plantas expuestas a diversos estreses bióticos y abióticos cuando están en presencia de luz (Salazar *et al.*, 2016). En hojas maduras y sanas los valores normales de  $F_v/F_m$  son cercanos a 0,8, su disminución indica la pérdida de la función fotosintética.

Se registró, además, como variables descriptivas del estado de las plantas, la altura (H), diámetro de cuello (DC) y vigor, este último mediante una apreciación visual que clasifica a las plantas en una escala cualitativa de cuatro categorías, desde 1 (planta sana) hasta 4 (planta muerta), tal como se indica en el **Cuadro 1**.

Los datos obtenidos fueron tabulados, se les efectuó análisis de varianza y Prueba de Tuckey (5%) para determinar diferencias en el efecto de la cobertura y subsulado sobre el vigor y crecimiento de las plantas. Se calculó también correlaciones entre tales variables y las lecturas registrada con fluorómetro ( $F_v/F_m$ ).

**Cuadro 1.** Categorías de vigor de plantas utilizadas en la evaluación

Vigor	Descripción
1	Planta sana, vigorosa, sin indicios de daño, capaz de crecer a la fecha de evaluación.
2	Plantas con ápice o follaje dañado, pero que no compromete su supervivencia.
3	Planta viva, pero débil, dañada, o secándose, con escasas posibilidades de supervivencia
4	Planta muerta.



**Figura 1.** Situaciones con y sin cobertura de dosel arbóreo superior utilizadas durante la evaluación de estrés en parcelas de plantación de hualo.



**Figura 2.** Ensayo de preparación de suelo, mostrando hileras de plantación sobre las líneas de subsolado (amarillo) y en entrelíneas sin subsolar (celeste).



**Figura 3.** Fluorómetro y pinza para oscurecimiento de hojas (izquierda); medición de plantas en terreno (derecha).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto Cobertura

En una evaluación preliminar, a los tres meses de edad, el ensayo de cobertura presentaba una supervivencia cercana al 100%, con la mayoría de sus plantas en la categoría de vivas y vigorosas, situación esperable debido a las favorables condiciones ambientales que enfrentan las plantas durante el invierno e inicio de primavera. Después de un año, se observó una importante disminución de la supervivencia, la que se reduce hasta el orden del 65%, a la vez, aumenta la proporción de plantas débiles y regulares, y se reduce muy considerablemente la proporción de plantas vigorosas.

Independientemente de la magnitud de las diferencias observadas en las parcelas de plantación entre los 3 meses y un año, es normal que después del primer periodo estival en terreno se manifieste un aumento de mortalidad de plantas. Ello es consecuencia del relativamente alto estrés ambiental (térmico e hídrico) que las plantas deben enfrentar estando aún en un muy incipiente estado de desarrollo.

Los resultados que se presentan en este artículo corresponden a los 29 a 34 meses de edad del ensayo, ocasión en que se evaluó fluorescencia como indicador de estrés, crecimiento y vigor de las plantas. El resumen de esta evaluación, sintetizada en el **Cuadro 2**, destaca que en todas las situaciones las plantas muestran valores de  $F_v/F_m$  inferiores a 0,8, signo de que están experimentando, en distintos grados, el efecto de factores de estrés que reducen su eficiencia fotosintética. En cuanto a crecimiento en altura y diámetro de cuello, no se manifestó diferencias atribuibles al efecto de la cobertura, situación que si fue observada para el parámetro  $F_v/F_m$ .

La variación de los valores de  $F_v/F_m$  entre temporadas de evaluación, y en las distintas condiciones de cobertura del dosel superior, se resume en el **Cuadro 3**. En él se observa que en términos estadísticos existen diferencias significativas en los valores de  $F_v/F_m$  presentados por las plantas con y sin cobertura ( $p$ -value = 0,0014), donde contrariamente a lo esperado, las plantas sin cobertura presentan una mejor condición (valores  $F_v/F_m$  más altos) que las plantas bajo protección (0,74 vs 0,69 respectivamente), indicando que el grado de estrés de las plantas bajo un dosel superior es mayor que en una condición abierta sin cobertura.

Respecto al efecto de la temporada (primavera verano otoño) este no resulta significativo ( $p$ -value = 0,1755). Por su parte la interacción entre cobertura y época de medición resulta significativa ( $p$ -value = 0,0044), observándose que el mayor estrés (menores valores de Fv/Fm) ocurre durante el verano en las plantas que cuentan con dosel arbóreo de protección; el menor estrés ocurre en las plantas sin cobertura también durante el verano, aun cuando no se diferencia del observado en otoño sin cobertura y el de primavera con o sin cobertura (**Cuadro 3**).

**Cuadro 2.** Evaluación de fluorescencia de clorofila (Fv/Fm) y crecimiento de plantas de 29 a 34 meses de edad con y sin cobertura de dosel de protección.

Temporada	Cobertura	n	Fv/Fm	H (cm)	DC (mm)
Primavera (Noviembre, 2022)	Sin cobertura	25	0,726	40,8	5,6
	Con cobertura	27	0,741	38,9	4,9
	<i>Promedio</i>	52	<i>0,734</i>	<i>39,8</i>	<i>5,3</i>
Verano (Enero, 2023)	Sin cobertura	25	0,758	41,4	5,4
	Con cobertura	27	0,654	38,4	5,1
	<i>Promedio</i>	52	<i>0,703</i>	<i>39,8</i>	<i>5,3</i>
Otoño (Abril, 2023)	Sin cobertura	25	0,748	38,5	5,1
	Con cobertura	27	0,680	34,5	4,7
	<i>Promedio</i>	52	<i>0,717</i>	<i>36,7</i>	<i>4,9</i>
Promedio General		156	0,718	38,9	5,2

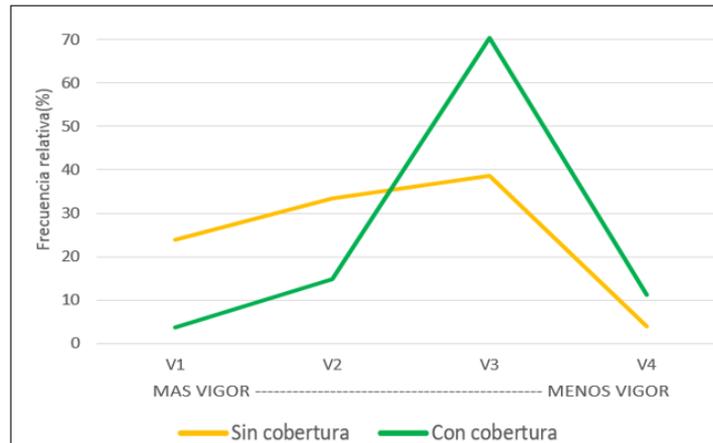
**Cuadro 3.** Variación de los valores de Fv/Fm entre temporadas y condición de cobertura

	Con cobertura	Sin cobertura	Efecto Temporada
Primavera	0,74 <sup>ab</sup>	0,72 <sup>ab</sup>	<b>0,73<sup>a</sup></b>
Verano	0,65 <sup>c</sup>	0,76 <sup>a</sup>	<b>0,71<sup>a</sup></b>
Otoño	0,68 <sup>bc</sup>	0,74 <sup>ab</sup>	<b>0,70<sup>a</sup></b>
<b>Efecto Cobertura</b>	<b>0,69<sup>b</sup></b>	<b>0,74<sup>a</sup></b>	

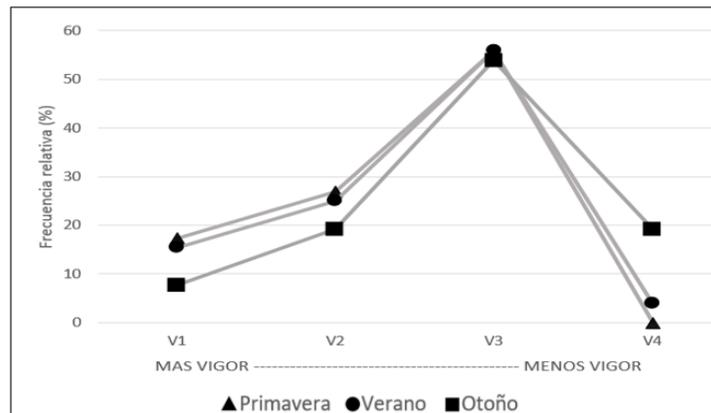
En **negrita** la diferenciación del efecto principal de los factores temporada ( $p$ -value = 0,1755) y cobertura ( $p$ -value= 0,0014); en sombreado diferenciación de la interacción entre los factores temporada y cobertura ( $p$ -value = 0,0044)

Análogamente a lo ocurrido con el estimador de estrés Fv/Fm, la distribución de plantas en categorías de vigor muestra el mismo comportamiento. Existe una diferencia evidente en la distribución de plantas de las condiciones con y sin cobertura, observándose que las plantas bajo dosel arbóreo se concentran en las categorías de bajo vigor (V3) y presentan menos plantas en las categorías vigorosas (V1 y V2), en relación lo observado para las plantas que crecen sin cobertura (**Figura 4**). De la misma forma y tal como ocurre con el parámetro Fv/Fm, las distribuciones de las plantas en categorías de vigor son muy similares entre temporadas (**Figura 5**).

Como efecto principal, independiente de la temporada, las plantas con cobertura presentan mayor estrés (**Cuadro 3**) y mayor concentración de plantas en categorías de bajo vigor (**Figura 4**), que aquellas creciendo en terreno descubierto. Existe una evidente correlación entre la respuesta al estrés exhibida por las plantas y estimada a través de la fluorescencia de clorofila y la apreciación en terreno del vigor de las mismas. Los coeficientes de correlación de la fluorescencia (estrés) con indicadores de vigor, como el vigor medio y la supervivencia, y con parámetros de crecimiento (altura y diámetro de cuello) se presenta en el **Cuadro 4**. En general el indicador de estrés se correlaciona mejor con los indicadores de vigor, que con los parámetros de crecimiento, siendo la mayor correlación la que se presenta entre las categorías de vigor y el valor de Fv/Fm (-0,435). En este caso la correlación es inversa, por cuanto las categorías de vigor son decrecientes, los números bajos son para plantas más vigorosas y los números altos para plantas menos vigorosas



**Figura 4.** Distribución de plantas de hualo en 4 categorías de vigor para distintas condiciones de cobertura.



**Figura 5.** Distribución de plantas de hualo en 4 categorías de vigor para las temporadas de primavera, verano y otoño.

**Cuadro 4.** Coeficientes de correlación entre el estimado de estrés Fv/Fm y variables indicativas de crecimiento y vigor en plantas de hualo de 28 a 34 meses en ensayo de cobertura.

	H	DC	Vigor medio	Supervivencia
Fv/Fm	0,26358566	0,20852818	-0,43543652	0,30792119

Los resultados obtenidos indican que, si bien los factores de estrés como la alta temperatura, insolación y sequía ocurren en forma simultánea durante la estación estival, no sería la temperatura ni la insolación la principal causa del estrés experimentado por las plantas, por cuanto la sombra ofrecida por el dosel de protección, que en teoría reduce la temperatura e insolación, no redujo el nivel de estrés de las plantas plantadas, ni mejoró su concentración en las categorías de mayor vigor.

La causa más relevante del estrés probablemente obedezca a la competencia por el agua disponible en el suelo, la cual sería principalmente utilizada por los individuos que forman el dosel de cobertura superior, los cuales cuentan con un mayor sistema radicular en relación a la de las plantas evaluadas y de tal forma

limitan su desarrollo. Consecuentemente las plantas ajo dosel enfrentan mayor estrés hídrico debido a la competencia ofrecida por la vegetación del estrato superior y por lo mismo exhiben menos vigor.

Esta explicación es coincidente con la expresada por Gajardo *et al.* (2021) quienes tras distintas iniciativas de restauración de bosque maulino costero afectado por incendios, cuestionan la conveniencia de realizar establecimiento de hualo bajo nodrizas, especialmente si existen limitaciones de agua.

### Efecto Subsulado

El ensayo establecido en condición con y sin subsulado fue evaluado inicialmente, después de una temporada de crecimiento en terreno, en esa ocasión la supervivencia de las plantas fue ligeramente superior para el tratamiento de subsulado (85,6%) que para el testigo sin subsolar (81,8%). Sin embargo, no se observó diferencias estadísticamente significativas entre el subsulado y el testigo en lo que respecta a crecimiento en altura y diámetro de cuello ni tampoco en términos del estrés experimentado por las plantas, determinado mediante fluorescencia de clorofila y expresado como la relación Fv/Fm, (Quiroz *et al.*, 2021; 2022). El vigor de las plantas, evaluado en una escala cualitativa de cuatro categorías, tampoco exhibió diferencias significativas atribuibles al subsulado.

Las mediciones posteriores que se evalúan en este artículo fueron realizadas en la primavera 2022, verano 2022/23 y otoño 2023, correspondientes a la tercera temporada de crecimiento (Cuadro 5). En esta ocasión se hace más evidente el positivo efecto del subsulado sobre la supervivencia, se hace extensivo al crecimiento en altura ( $p\text{-value} = 0,0017$ ) y diámetro de cuello ( $p\text{-value} = 0,0001$ ) y también a la relación Fv/Fm, aunque en este último caso el efecto es apenas significativo ( $p\text{-value} = 0,0495$ ) (Cuadro 6).

**Cuadro 5.** Evaluación de estrés y crecimiento de plantas de hualo de 29 a 34 meses de edad con y sin subsulado.

Medición	Tratamiento	n	Fv/Fm	H (cm)	DC (mm)
Primavera (Noviembre, 2022)	Subsulado	30	0,743	50,0	9,6
	Sin subsolar	30	0,735	40,5	7,4
	Promedio Primavera	60	0,739	45,3	8,5
Verano (Enero, 2023)	Subsulado	30	0,725	57,6	10,2
	Sin subsolar	30	0,692	46,8	8,1
	Promedio Verano	60	0,710	52,7	9,2
Otoño (Abril, 2023)	Subsulado	30	0,740	63,2	11,5
	Sin subsolar	30	0,708	50,5	9,2
	Promedio Otoño	60	0,727	57,9	10,5
Promedio General		180	0,725	51,2	9,3

**Cuadro 6.** Caracterización de plantas de hualo durante su tercera temporada de crecimiento en suelo subsulado y sin subsolar

Tratamiento del suelo	Supervivencia (%)	Altura (cm)	Diámetro de cuello (mm)	Fv/Fm
Subsulado	57,1	56,79 <sup>a</sup>	10,42 <sup>a</sup>	0,74 <sup>a</sup>
Sin subsolar	44,7	46,59 <sup>b</sup>	8,31 <sup>b</sup>	0,71 <sup>b</sup>
<i>p-value</i>		0,0017	0,0001	0,0495

Respecto al parámetro Fv/Fm, este no experimentó variación significativa entre temporadas, tal como ya había sido observado en el ensayo de cobertura del punto anterior; tampoco interacción entre temporada y subsulado; y solo un pequeño efecto, aunque estadísticamente significativo, del factor subsulado. En esta

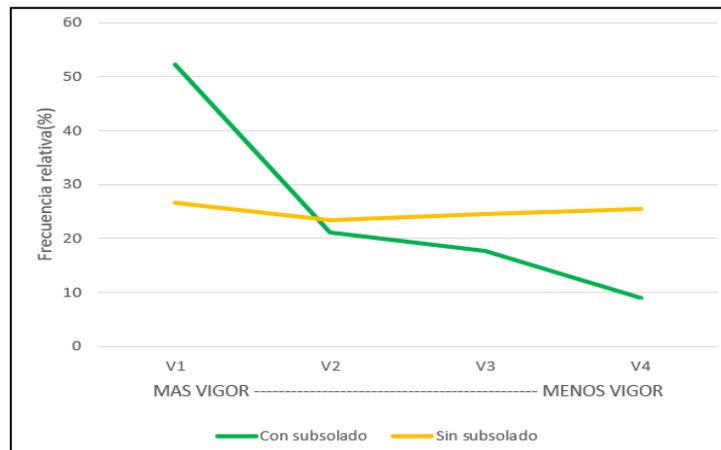
última condición las plantas evidenciaron menos estrés, es decir valores de Fv/Fm más altos que en el suelo sin subsolar (**Cuadro 7**).

**Cuadro 7.** Variación de los valores de Fv/Fm entre temporadas y tratamiento del suelo

	Con subsolado	Sin subsolado	Efecto temporada
Primavera	0,74 <sup>a</sup>	0,74 <sup>a</sup>	<b>0,74<sup>a</sup></b>
Verano	0,73 <sup>a</sup>	0,69 <sup>a</sup>	<b>0,71<sup>a</sup></b>
Otoño	0,74 <sup>a</sup>	0,71 <sup>a</sup>	<b>0,72<sup>a</sup></b>
<b>Efecto subsolado</b>	<b>0,74<sup>a</sup></b>	<b>0,71<sup>b</sup></b>	

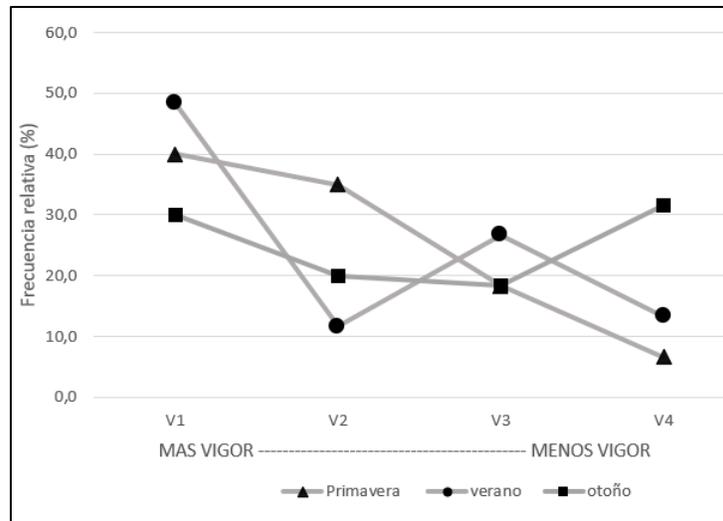
En **negrita** la diferenciación del efecto principal de los factores temporada ( $p$ -value = 0,1039) y subsolado ( $p$ -value= 0,045); en **sombreado** diferenciación de la interacción entre los factores temporada y cobertura ( $p$ -value = 0,6343)

El comportamiento de Fv/Fm es consistente con lo observado en la distribución de plantas en categorías cualitativas de vigor, situación que ya había sido observada en el caso del ensayo de cobertura del punto anterior. En el subsolado, donde las plantas presentan menos estrés de acuerdo a lo indicado por Fv/Fm, existe aproximadamente el doble de individuos en la categoría más vigorosa (categoría 1), y una proporción considerablemente menor de plantas muertas o de menor vigor (categorías 4 y 3, respectivamente) que en el testigo sin subsolar (**Figura 6**). Por su parte la distribución de plantas en categorías de vigor entre temporadas no exhibe tendencias claras, resultando en un comportamiento heterogéneo (**Figura 7**) que contrasta con la regularidad observada en el ensayo anterior (**Figura 5**).



**Figura 6.** Distribución de plantas de hualo en 4 categorías de vigor para distintas condiciones de cobertura.

La correlación entre el estimador de estrés (Fv/Fm) y el vigor cualitativo de las plantas es evidente, y en este caso se extiende también a las variables de crecimiento y a la supervivencia, tal como se detalla en los coeficientes de correlación del **Cuadro 8**.



**Cuadro 8.** Coeficientes de correlación entre el estimado de estrés Fv/Fm y variables indicativas de crecimiento y vigor en plantas de hualo de 28 a 34 meses en ensayo de subsolado.

	H	DC	Vigor Medio	Superv
<b>Fv/Fm</b>	0,447610798	0,311732119	-0,6009811	0,436782402

La preparación del sitio de plantación juega un papel fundamental en la mejora de la disponibilidad de agua y de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del suelo, afectando en gran medida la supervivencia de las plantas (Marzo *et al.*, 2015). Particularmente, los suelos del secano costero presentan cierto grado de compactación, esta compactación limita el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua de que disponen las raíces, influyendo así en la supervivencia y desarrollo de las plantas. Por lo mismo, la práctica del subsolado tiene un indiscutido efecto para mejorar el establecimiento y se ha constituido en una labor habitual en la preparación de suelos para plantaciones forestales.

Lo anterior queda de manifiesto en los resultados del presente estudio, donde conforme a lo esperado, las plantas presentan un mejor desempeño en términos de crecimiento, supervivencia, vigor y estrés cuando están establecidas en suelo subsolado que en el testigo sin subsolar.

Respecto de la ausencia del efecto del subsolado sobre esas variables durante la primera temporada de crecimiento, esta se debería a que en ese periodo las raíces se expandirían solo dentro de la casilla de plantación, de modo que la compactación del suelo no constituiría aún una restricción para el crecimiento radicular de las plantas durante el primer año post plantación. Sin embargo, en las temporadas posteriores, a medida que las plantas crecen y sus raíces requieren explorar niveles más profundos del suelo, comienza a hacerse evidente la ventaja que representa efectuar subsolado para establecer la plantación, tal como se evidenció en este estudio.

## CONCLUSIONES

Durante los primeros años post establecimiento, las plantas de hualo enfrentan condiciones severas que limitan su establecimiento y que se manifiestan en niveles de estrés y pérdidas de vigor que se hacen mayores en las condiciones donde prevalece un dosel superior de cobertura arbórea (o en suelos sin subsolar), respecto del que manifiestan en condiciones sin cobertura (o suelo subsolado).

La fluorescencia de clorofila, usada como un estimador de estrés mediante el parámetro Fv/Fm, confirma un comportamiento consistente con el vigor de las plantas observado en terreno, y en medida variable con parámetros de crecimiento de las mismas.

## REFERENCIAS

- Ceacero, C., Díaz, J., del Campo, A. & Navarro, R. (2012).** Early assessment of forest restoration techniques using chlorophyll fluorescence and diagnosis of oak (*Quercus ilex* sub. *ballota*) seedlings vitality. *Bosque*, 33(2): 191-202.
- Gajardo, J., Ormazábal, Y., Yáñez, M., Gómez, P., Garrido, P., Hahn, S., Mora, M. & Carrasco, M. (2021).** Informe final del proyecto FIBN 10/2017. Datos y técnicas de teledetección para la restauración ecológica de los bosques nativos degradados por incendios forestales. Talca, Chile. 127 p.
- González, S., Perales, H. & Salcedo, M. (2008).** La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica* 27(4): 119-129.
- Jimenez, M., Alvarado, O. & Balaguera, H. (2015).** Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(1): 149-160. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3753>
- Marzo, A., Herreros, R. & Zreik, Ch. (Eds). (2015).** Guía de Buenas Prácticas de Restauración en Hábitats Mediterráneos. Ecoplantmed, ENPI, CBC-MED.
- Maxwell, K., & Johnson, G. (2000).** Chlorophyll fluorescence: a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659-668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- Quiroz, I., Espinoza, S., Yáñez, M., Magni, C., Martínez, E., Gutiérrez, B., Faúndez, A. & Vaswani, S. (2022).** Provenance causes variation on early growth and survival and sun protection on physiological responses of the vulnerable *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser in a common garden in Central Chile. *Environmental and Sustainability Indicators*, 15, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100192>
- Quiroz, I., Gutiérrez, B., Magni, C., Faúndez, A., Martínez, E., Espinoza, S. & Yáñez, M. (2021).** Técnicas de Conservación de Hualo en el Secano Costero en Comunidades Boscosas Mediterráneas. Informe Técnico Anual Ensayos Experimentales. Contrato de Desempeño INFOR-Subsecretaría de Agricultura. (Informe interno no publicado). Diciembre 2021. 32 p.
- Roháček, K., Soukupová, J. & Barták, M. (2008).** Chlorophyll fluorescence: a wonderful tool to study plant physiology and plant stress. *Plant Cell Compartments-Selected Topics. Research Signpost, India*, 661(2): 41-104.
- Salazar, C., Pino, MT. & Villagra, P. (2016).** La emisión de fluorescencia de la clorofila a: una herramienta para la detección del efecto del estrés hídrico en el aparato fotosintético de la papa. En: Pino, MT. (Ed). Estrés hídrico y térmico en papas, avances y protocolos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Platina. Santiago. Boletín INIA, N° 331. Capítulo 6. Pp: 71-85.





---

ARTÍCULO

## Esquemas de Manejo para el Cultivo de Pino Piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile.

Verónica Loewe Muñoz<sup>1\*</sup> & Claudia Delard Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniera Forestal Dr. Instituto Forestal, Chile y Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile. vloewe@infor.cl

<sup>2</sup>Ingeniera Forestal. Instituto Forestal, Chile. cdelard@infor.cl

\* Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.604>

Recibido: 15.03.2024; Aceptado 10.04.2024

---

### RESUMEN

*Pinus pinea* L. es originario de la cuenca del Mediterráneo, fue introducida a Chile por colonos europeos en el siglo XIX para producir piñones y para protección de suelos y ganado; está adaptado a diferentes condiciones de sitio en la zona centro-sur del país; es apropiada para uso agroforestal y silvopastoreo; y sus semillas, los piñones, son un producto de alto valor en el mercado internacional de frutos secos. La especie puede ser empleada en plantaciones puras o en combinaciones agroforestales, bajo diferentes esquemas e intensidades de manejo y en variados sectores de la zona centro-sur del país. En el presente trabajo se efectúa un análisis económico que considera los costos, la producción y los ingresos generados por la especie en plantaciones bajo tres esquemas de manejo; una plantación bajo manejo silvícola de mediana intensidad, un sistema agroforestal bajo manejo de mediana intensidad y una plantación bajo silvicultura intensiva. Bajo los más probables escenarios de producción y precios y una tasa de interés de 6% y 8%, los tres esquemas muestran un valor neto presente positivo, siendo el esquema de silvicultura intensiva el más rentable y el esquema silvopastoral más rentable que el de silvicultura de mediana intensidad y de fácil implementación para los propietarios.

**Palabras clave:** *Pinus pinea*, Producción de conos, Sistemas agroforestales, Análisis económico.

### SUMMARY

*Pinus pinea* L. is a species native to the Mediterranean basin, it was introduced to Chile by European settlers to protect soil and livestock in the XIX century. The species presents an interesting adaptation to different site conditions in the central and central southern zone of the country, and it can be used in agroforestry systems. Furthermore, the seeds, the Pine Nuts, are a non-wood product of high value in the international markets of dry fruits. The species can be used in pure plantations or in agroforestry combinations, under different management schemes and intensities and in various sectors of the central southern zone of the country. In this work, an economic analysis is carried out considering the costs, production and income generated by the species in plantations under three management schemes; a plantation under medium intensity silvicultural management, an agroforestry system under medium intensity management and a plantation under intensive forestry. Under the most probable production and price scenarios and an interest rate of 6% and 8%, the three schemes show a positive net present value, with the intensive forestry scheme being the most profitable and the silvopastoral scheme more profitable than the forestry medium intensity scheme, being also easy to implement by landowners.

**Keywords:** *Pinus pinea*, Cone production, Agroforestry systems, Economic analysis

---

## INTRODUCCIÓN

El pino piñonero se ha plantado para la producción de piñones durante más de 6.000 años y sus piñones se han recolectado de árboles silvestres desde mucho antes (Lim, 2012). Incluso en la actualidad, los piñones se cosechan principalmente en bosques naturales prácticamente no manejados y son considerados un producto forestal no maderero (PFNM).

Las plantaciones de pino piñonero están aumentando en el hábitat nativo de la especie, especialmente en Portugal, Turquía y España (Mutke, 2020). La especie se integra fácilmente a sistemas agroforestales (Eichhorn *et al.*, 2006; Reisner *et al.*, 2007), asociada a cultivos agrícolas (Mutke *et al.*, 2007), viñedos y pastos (Gordo *et al.*, 2011). Dado que la producción europea es de alto costo e insuficiente para satisfacer la demanda (Vanhanen & Savage, 2013), se están realizando esfuerzos para cultivar pino piñonero en otros países con clima mediterráneo, como Túnez, Nueva Zelanda, Australia, Argentina y Chile.

Hace más de dos siglos, el pino piñonero fue introducido en Chile por inmigrantes europeos para proteger el suelo y el ganado (Loewe & Noel, 2021). El suelo y el clima del país son adecuados para el crecimiento y fructificación de la especie (Loewe *et al.*, 2015b, 2016). Los elevados ingresos anuales de hasta 3.200 US\$/ha derivados de la producción de conos (Loewe & Delard, 2012) hacen de la especie una opción atractiva para los propietarios de tierras forestales, incluso en sistemas agroforestales (Loewe & Delard, 2019).

El pino piñonero es una especie multipropósito que proporciona madera, leña y oportunidades de esparcimiento, puede soportar sequías (Tramblay *et al.*, 2020) y tiene una demanda hídrica menor que los árboles frutales tradicionales. Sus semillas comestibles, los piñones, han sido recomendadas como parte de una dieta saludable (Estruch *et al.*, 2018). Es el fruto seco más caro del mundo, los precios al por mayor oscilan entre 20 y 78 US\$/kg y desempeña un papel importante en muchas economías rurales (Barranco & Ortuño, 2004; INC, 2019). Además, la especie proporciona múltiples beneficios ambientales, como fuente de alimento para la fauna, protección de cuencas, recuperación y protección del suelo, y otros, que pueden superar el valor de comercialización del piñón (Campos *et al.*, 2011). La especie también genera importantes beneficios socioeconómicos, incluidos ingresos y empleos, como se ha informado en su zona de origen (Awan & Pettenella, 2017; Küçüker & Baskent, 2017) y más allá, como en Túnez (Ammari *et al.*, 2011) y el Líbano (Sattout & Faour, 2017). Es así como la especie puede contribuir en forma significativa a los ingresos de los propietarios de tierras forestales y a las pymes en actividades rentables y productivas que generen retornos anuales.

Este trabajo se centra en la producción de pino piñonero en Chile. Se analizan los retornos económicos bajo tres esquemas de cultivo y se discuten las posibles contribuciones a la economía rural a través de la generación de ingresos, empleos y otros impactos positivos.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Esquemas de Manejo

Para cuantificar el valor de las inversiones (valor neto presente) y la rentabilidad (tasa interna de retorno) del cultivo de pino piñonero, se comparó plantaciones de 1 ha establecidos en el centro de Chile con los siguientes esquemas de manejo: Plantación manejada bajo media intensidad, la más común en el país; Sistema agroforestal manejado bajo intensidad media; y plantación bajo manejo de alta intensidad.

En los tres sistemas se aplicaron igualmente las siguientes técnicas de manejo: Subsulado, plantación de 278 árboles/ha (6 x 6 m), control de malezas durante ocho años, poda cada cinco años y raleo a los 25 años quitando el 50% de los árboles. Los sistemas se diferenciaron en la fertilización, que en los esquemas de manejo de media y alta intensidad se aplicó cada cinco años (Loewe *et al.*, 2020a), mientras que para el sistema agroforestal se suministró anualmente en los primeros ocho años, según los requisitos de los cultivos intercalados, y luego periódicamente cada cinco años.

Los sistemas también diferían en el riego: Semanalmente a través de un sistema de goteo automático durante la primavera y el verano durante toda la rotación para el esquema de manejo de alta intensidad; manualmente en primavera y verano solo durante los primeros ocho años después del establecimiento para los esquemas de manejo de intensidad media, semanalmente para el sistema agroforestal y mensual para la plantación pura.

El sistema agroforestal incluyó dos años de cultivos intercalados de papa, seguidos de silvopastoreo (avena forrajera para ovejas para la producción de carne) del año 3 al 8. No se empleó ninguna protección individual de los árboles contra las ovejas.

### Recopilación de Datos

Para realizar los análisis económicos se recogieron datos primarios y secundarios sobre costos, producción e ingresos:

- *Costos*

Los costos de mano de obra se estimaron utilizando mediante una encuesta realizada en 2020 en Chile central (regiones del Maule a la Araucanía), mientras que los costos de insumos se obtuvieron de una encuesta realizada en tiendas especializadas locales (Homecenter, Easy, ANASAC, entre otras). En **Apéndice 1** se proporciona una descripción general de los costos.

- *Producción*

Para los datos del sistema agroforestal se registró la producción de papa, avena forrajera y ovejas durante ocho años en una plantación experimental ubicada en la región de Ñuble, centro de Chile (Loewe & Delard, 2019).

Las estimaciones de la producción de conos se basaron en registros existentes de Chile (Loewe & Delard, 2012; Loewe *et al.*, 2016, 2020a, 2020b) y en una revisión de la literatura realizada utilizando bases de datos disponibles (ACS Web Editions, Annual Reviews, Nature collection, Elsevier Science Direct-Freedom Collection, Oxford University Press, Science Magazine, Springerlink, Wiley-Blackwell). La producción de conos se calculó mediante un ejercicio de simulación, ya que en el país no existen plantaciones productivas manejadas de 60 años (**Apéndice 2**) (Loewe & Delard, 2012).

El pino piñonero se caracteriza por la variabilidad interanual en la producción de conos en su hábitat nativo (Calama *et al.*, 2008) y también en Chile (Loewe *et al.*, 2020b). En los esquemas de manejo de intensidad media, a una producción alta le siguen dos años de producción reducida a la mitad. En el esquema de manejo de alta intensidad, debido al riego, a la producción esperada le siguen dos años de una producción reducida del 40%. Se utilizó un peso promedio de cono de 495 g (Loewe *et al.*, 2016).

- *Ingresos*

Para el sistema agroforestal se utilizaron los precios de papas y ovino del mercado nacional (ODEPA, 2022). Los conos están valorados en 1,05 dólares el kg (Correia, 2019). La leña derivada del raleo se valoró en 3,9 US\$/m<sup>3</sup>, y los troncos cosechados al final de la rotación (71,5 m<sup>3</sup>/ha) se valoraron en 47,8 US\$/m<sup>3</sup>. Los valores de los ingresos se presentan en **Apéndice 3**.

### Evaluación Económica

Para realizar un análisis de sensibilidad, se utilizaron cuatro escenarios:

- Producción más probable y precio de cono más probable (1,05 US\$/kg).
- Producción más probable con precio de cono pesimista (reducción del 10%, 0,95 US\$/kg).
- Producción pesimista (reducción del 20%) con precio más probable.

- Producción pesimista y precio pesimista. El valor de la tierra se incluye como alquiler (294 US\$/ha/año) (García & Laval, 2019).

El análisis consideró una plantación de 1 hectárea evaluada en un horizonte de 60 años. Los indicadores económicos calculados para dar cuenta del costo de oportunidad del tiempo necesario para generar productos durante muchos años fueron:

- Valor presente neto (VPN) que es la diferencia entre el valor presente de las entradas y salidas de efectivo, descontado a tres tasas de interés (6% y 8% utilizados en evaluaciones sociales del Ministerio de Desarrollo Social de Chile, y 10%, utilizado por inversionistas privados, que representan el costo de oportunidad).
- Tasa Interna de Retorno (TIR).

## RESULTADOS

Los resultados de la evaluación económica para los tres esquemas de gestión bajo cuatro escenarios de producción y precios, y sensibilidad a las tasas de interés, son presentados a continuación.

### Plantación Manejada con Intensidad Media

La producción de conos en los escenarios más probables de producción y precios, considerando una inversión inicial de 1.754 US\$/ha, mostró una rentabilidad positiva con tasas de descuento del 6% y 8%. En el escenario pesimista de precio o producción, fue rentable solo al 6%, y cuando tanto el precio como la producción disminuyeron, la rentabilidad fue negativa en todos los casos. En cuanto al empleo, la mano de obra estimada necesaria anualmente fue de 63 días laborables por hectárea después de alcanzar una producción estable de conos a los 40 años.

### Sistema Agroforestal Manejado con Intensidad Media

La producción de conos implicó el cultivo intercalado de papas durante dos años, seguido del cultivo de avena forrajera para el pastoreo de ovejas durante seis años. Por esta razón, la evaluación incluyó los ingresos derivados de la producción ovina y de la papa (**Apéndice 3**). En el escenario más probable de producción y precios, considerando una inversión inicial de 2.176 US\$/ha, se observó una rentabilidad positiva en todas las tasas de descuento. En un escenario de precio o producción pesimista, el sistema era rentable con todas las tasas de descuento, y en el escenario de producción y precio pesimista, la rentabilidad era positiva al 6% y 8%. En el escenario más probable de producción y precios con una tasa de descuento del 8%, el VPN fue casi 3,5 veces mayor en el sistema agroforestal (conos, papa y ovejas) que en el monocultivo bajo el mismo manejo de intensidad media (5.760 US\$/ha vs. 1.660 US\$/ha). En este modelo se observó la TIR más alta (13,9%). En cuanto al empleo, la mano de obra requerida anualmente fue de 63 días hábiles por hectárea una vez alcanzada una producción estable de conos, sin embargo, durante los primeros ocho años este sistema requirió mucha mano de obra.

Los cultivos probados no tuvieron ningún impacto negativo en el desarrollo de los árboles. La producción ovina equivalía a entre 3,7 y 4,4 ovejas/ha/año. Las ovejas no dañaron los árboles, aunque fueron introducidas al sistema a la edad de plantación de tres años, lo que representa un correcto manejo de la carga animal. A los ocho años de edad de la plantación, la sombra de las copas expandidas comenzó a dificultar el cultivo intercalado de avena forrajera, en consecuencia, las ovejas pastaban extensivamente, y esta producción reducida no se incluyó en la evaluación. Los rendimientos de los cultivos obtenidos fueron inferiores al promedio del país. En el caso de la papa, el rendimiento promedio alcanzó los 13.225 kg/ha, equivalente al 45% de la producción promedio nacional (Tapia, 2021). Para la avena forrajera el rendimiento (2.332 kg/ha) representó el 45% del rendimiento promedio nacional de 5.200 kg/ha (García & Riveros, 2019). Así, los pinos piñoneros impactaron negativamente en la producción de papas y ovejas en comparación con la producción sin árboles. Sin embargo, el sistema integrado demostró ser más rentable con la misma intensidad de gestión. La producción de conos no se vio afectada por los cultivos intercalados ya que comenzó después de que el sistema agroforestal ya no estaba en uso.

## Plantación Manejada Bajo Alta Intensidad

Con una inversión inicial de 3.519 US\$/ha, el doble que, en la plantación manejada de intensidad media, el riego permanente permitió una rentabilidad positiva en 8 de los 12 escenarios modelados. De hecho, el riego condujo a una producción más temprana y mayor de conos, lo que se tradujo en una rentabilidad positiva en el escenario más probable de producción y precios con todas las tasas de descuento, incluido el 10%. Con una tasa de interés del 8% la rentabilidad fue positiva, salvo en el escenario pesimista de precios y producción; con un 6%, la rentabilidad siempre fue positiva. En cuanto al empleo, la mano de obra estimada requerida anualmente fue de 69 días laborables por hectárea una vez alcanzada una producción estable de conos.

## DISCUSIÓN

El pino piñonero es un cultivo emergente en muchas zonas, incluida América del Sur (Dube *et al.*, 2015). Sus piñones son muy apreciados, con precios en aumento. La plasticidad de la especie en diferentes ambientes, junto con sus menores requerimientos hídricos que los de la mayoría de árboles frutales, la hace atractiva para enfrentar los desafíos del cambio climático. Estas características son esenciales en las zonas mediterráneas, donde se esperan sequías cada vez más severas (Tramblay *et al.*, 2020).

El cultivo de pino piñonero bajo diferentes esquemas de manejo es posible en Chile y otros lugares fuera de sus áreas de distribución natural. El desarrollo de una cadena de valor de pino piñonero cultivado en varios países de bajos ingresos ha contribuido a la actividad económica rural, con impactos sociales y ambientales sobresalientes (Sülüsoglu, 2004; Schröder *et al.*, 2014).

La integración de la agrosilvicultura para el cultivo de pino piñonero puede desempeñar un papel crucial para sectores rurales; Además, los sistemas mixtos mejoran la biodiversidad y al mismo tiempo preservan los paisajes. El sistema agroforestal manejado bajo intensidad media fue más rentable (3,5 veces mayor VPN) que la plantación manejada de manera similar en el escenario más probable de producción, precio y tasa de descuento.

Se informan resultados similares en Australia (Garland *et al.*, 1984) y Nueva Zelanda (Arthur-Worsop, 1985), donde el sistema combinado fue más rentable que los sistemas puramente pastoriles, agrícolas o de plantaciones. El impacto económico positivo de combinar pino piñonero y animales se informó en Italia y Chipre (Agrimi & Ciancio, 1994; Pardini & Nori, 2011). De hecho, las áreas sombreadas producen mejores pastos (Trap, 1993), las fecas de animales promueven el crecimiento (Loewe-Muñoz y Delard, 2019) y el pastoreo limita el crecimiento de pastos y arbustos, reduciendo el costo del control de malezas (Pinoli, 2019). También se informan impactos ambientales positivos, incluida la reducción del riesgo de incendios (Peña & Pedernera, 2004).

La agrosilvicultura fue el sistema con mayor resiliencia financiera a las caídas de precios y producción. Los propietarios de tierras con recursos limitados pueden establecer fácilmente este sistema, beneficiándose de la integración de otros cultivos en plantaciones manejadas bajo intensidad media. Los ingresos anuales provenientes de cultivos y animales son importantes para la economía familiar, especialmente durante los primeros años cuando los árboles aún no dan frutos.

El sistema manejado bajo alta intensidad fue el más rentable, lo que se atribuye al efecto del riego permanente, que aumentó significativamente la producción de conos (Butler *et al.*, 1997; Loewe *et al.*, 2016).

El cultivo de pino piñonero puede proporcionar importantes beneficios en zonas rurales desfavorecidas y necesitadas de estímulos económicos (Peterson, 2007), ya que promueve directamente el desarrollo económico, a través de la venta de conos o piñones, e indirectamente, a través de la compra de bienes y servicios relacionados. Además, el aumento de los ingresos y el empleo, estimado entre 63 y 69 jornadas/ha/año después de alcanzar una producción estable de conos, puede contribuir a reducir la emigración rural (Barranco & Ortuño, 2004).

En Chile, se han establecido nuevas plantaciones para la producción de piñones en más de 5.000 ha junto con avances en las técnicas de cultivo (Loewe *et al.*, 2015, 2016, 2020a, 2020b; Loewe & Delard, 2016). Ávila *et al.* (2012) vincularon las áreas de cultivo potenciales de la especie con el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y las áreas con alto potencial para el cultivo de pino piñonero, donde se espera mejore el IDH, superan los 2,3 millones de hectáreas, lo que indica la posibilidad de obtener beneficios socio económicos amplios.

La integración más amplia de esta prometedora especie en el sector forestal del país plantea algunos desafíos. Es necesario el establecimiento de nuevas plantaciones para alcanzar un área plantada crítica y un mayor desarrollo de técnicas de cultivo sostenibles, y se requiere de plantas procesadoras de conos que favorezcan aún más las economías locales y el posicionamiento de los productos chilenos en los mercados internacionales; adicionalmente, sería muy conveniente la creación de una marca país para comercializar piñones cultivados localmente. Abordar estos desafíos evidentemente exige apoyo político.

## RECONOCIMIENTOS

Las autoras agradecen el financiamiento de ANID BASAL FB210015 (CENAMAD) y del programa “Desarrollo y aportes para la utilización de especies forestales y fruto-forestales de alto valor para Chile” del Ministerio de Agricultura, Chile.

## CONCLUSIONES

Este trabajo proporciona información para comprender mejor cómo la producción de conos y piñones puede contribuir al desarrollo de la economía rural en Chile.

El cultivo de pino piñonero bajo tres esquemas de manejo mostró atractivos beneficios económicos.

El sistema de manejo bajo alta intensidad resultó ser el más rentable, con un VPN de hasta 6.400 US\$/ha.

El sistema agroforestal manejado bajo intensidad media, que los propietarios pueden implementar fácilmente, fue más rentable que la plantación manejada bajo intensidad media y además tuvo la mayor resiliencia financiera.

El cultivo de pino piñonero proporcionaría a los mercados locales y de exportación piñones de alta calidad, alto valor, saludables y potencialmente producidos de manera equitativa, para ayudar a satisfacer la creciente demanda mundial. Este cultivo emergente puede contribuir a la transición hacia una mejor economía rural favoreciendo un desarrollo rural sostenible e inclusive, con beneficios económicos anuales, beneficios sociales con la creación de empleo y beneficios ambientales con la protección de suelos y aguas, y el secuestro de carbono.

## REFERENCIAS

**Agrimi, M. & Ciancio, O. (1994).** Le pin pignon (*Pinus pinea*). Lanark: FAO Silva Mediterranean. 115 p.

**Amari, Y., Sghaier, T., Solano, D., Aleta, N., Bono, D., Hothmani, H., Albouchi, A. et al. (2011).** The Stone Pine in Tunisia. International Meeting on Mediterranean Stone Pine for Agroforestry (Atropine). Iamz-Ciheam. Valladolid.

**Arthur-Worsop, M.J. (1985).** An economic evaluation of agroforestry. *New Zealand Agricultural Science*, 19(3): 99-106.

**Ávila, A., Loewe, V. & Delard C. (2012).** Impacto social del cultivo. En: Loewe, M.V. & Delard, C. (Eds.) Un nuevo cultivo para Chile. El pino piñonero. INFOR-CORFO, Santiago, Chile. Pp: 241-246.

- Awan, H. & Pectenella, D. (2017).** Pine Nuts: sanitary conditions and market development. *Forests*, 8(10): 367. <https://doi.org/10.3390/f8100367>
- Barranco, J. & Ortuño, S. (2004).** Aproximación del sector del piñón. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, N° 201. Pp: 165-189.
- Butler, I., Abellanas, B., Monteagudo, F., Bastida, F. & López, J. (1997).** First results of a trial in agronomic grafting in Stone Pine. *Proc. 2<sup>nd</sup> Spanish Forest Congress. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pamplona*. Pp: 99-104.
- Calama, R., Gordo, J., Mutke, S. & Montero, G. (2008).** An empirical ecological-type model for predicting Stone Pine cone production in the Northern Plateau (Spain). *Forest Ecology and Management*, 255(3-4): 660-673. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.079>
- Campos, P., Ovando, P. & Oviedo, J.L. (2011).** Proyecto RECAMAN: Renta total y capital del bosque de pino piñonero. In *Jornadas sobre Pinar, Pino, VPN y Piñón. Córdoba*. 23 p.
- Correia, A. (2019).** Mediterranean Stone Pine and Pine nuts: knowledge for a better management Enhanced production of edibles from forests and orchards; Tunisia, November 12<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>. En: [https://inovacao.rederural.gov.pt/images/Docs/GO\\_Documentos/Stone\\_pine\\_TUNISIA\\_Alexandra\\_Correia\\_no\\_v2019\\_1.pdf](https://inovacao.rederural.gov.pt/images/Docs/GO_Documentos/Stone_pine_TUNISIA_Alexandra_Correia_no_v2019_1.pdf) (Consulta: April, 2021).
- Dube, F., Sotomayor, A., Loewe, M.V., Müller-Using, B., Stolpe, N., Zagal, E. & Cabrera, C. (2015).** Silvopastoral systems in temperate Chile. In: Dube, F. (Ed.). *Silvopastoral systems in South America*. Springer, Gainesville. Pp. 190-218.
- Eichhorn, M.P., Paris, P., Hderzog, F., Incoll, L.D., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M. et al. (2006).** Silvoarable systems in Europe, past, present and future prospects. *Agroforestry Systems*, N° 67. Pp: 29-50. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_8)
- García, A. & Laval, E. (2019).** Boletín cereales. ODEPA, Chilean Ministry of Agriculture. 63 p. En: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/BCereales092019.pdf> (Consulta: Mayo, 2021)
- García, A. & Riveros, P. (2019).** Avena: situación nacional. ODEPA-MINAGRI, 15p. En: [www.odepa.gob.cl](http://www.odepa.gob.cl) (Consulta: Abril, 2021).
- Garland, K.R., Fisher, W.W. & Greig, P.J. (1984).** Agroforestry in Victoria. Technical Report Series. Dept. Agriculture, Victoria, 93. 114 p.
- Gordo, J., Mutke, S., Calama, R. & Gil, L. (2011).** El uso del pino piñonero en sistemas agroforestales. Proceeding of Jornadas de cultivos alternativos con especies forestales, 21 y 22 de septiembre de 2011, Valladolid. Junta de Castilla y León, Valladolid. 34 p. En: [www.redforesta.com/wp-content/uploads/2011/09/El-uso-del-pino-piñonero-en-sistemas-agroforestales-Francisco-Javier-Gordo-Alonso.pdf](http://www.redforesta.com/wp-content/uploads/2011/09/El-uso-del-pino-piñonero-en-sistemas-agroforestales-Francisco-Javier-Gordo-Alonso.pdf) (Consulta: Abril, 2021)
- INC (2019).** Nuts & Dried Fruits Statistical Yearbook 2019/20. International Nut and Dried Fruit Council, Reus, Spain. 80 p. En: [www.nutfruit.org/files/tech/1587539172\\_INC\\_Statistical\\_Yearbook\\_2019-2020.pdf](http://www.nutfruit.org/files/tech/1587539172_INC_Statistical_Yearbook_2019-2020.pdf) (Consulta: Abril, 2021)
- Küçüker, D.M. & Baskent, E.Z. (2017).** State of Stone Pine forests in Turkey, economic importance. In: Carrasquinho I. & Correia A.C. (Eds). *Pine nuts from forests and plantations. CIHEAM, Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens*, 122(2): 111-117.
- Lim, T.K. (2012).** *Pinus pinea*. In: *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants*, Volume 4. Lim, T.K. (ed.). Springer, Dordrecht. Pp: 304-303. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4053-2\\_39](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4053-2_39)
- Loewe-Muñoz, V. & Noel, D. (2021).** Mediterranean *Pinus pinea* nuts from Southern Hemisphere countries. *Rendiconti Lincei*, 32(1): 181-189. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-00980-8>
- Loewe, M.V. & Delard R.C. (2012).** Un nuevo cultivo para Chile. *El Pino Piñonero*. INFOR-CORFO, Santiago. 364 p.
- Loewe, M.V. & Delard, R.C. (2016).** Producción de piñón mediterráneo. INFOR, Santiago, Chile. 108 p.

- Loewe, V. & Delard, C. (2019).** Stone pine (*Pinus pinea*): An interesting species for agroforestry in Chile. *Agroforestry Systems*, 93(2): 703-713. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0166-6>
- Loewe, M.V., Delard, R.C., Balzarini, M., Álvarez, C.A. & Navarro-Cerrillo, R.M. (2015).** Impact of climate and management variables on Stone Pine growing in Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, N° 214-215 Pp: 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.248>
- Loewe, M.V., Balzarini, M., Álvarez, A., Delard, C. & Navarro-Cerrillo, R.M. (2016).** Fruit productivity of Stone Pine in Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, N° 223. Pp: 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.011>
- Loewe-Muñoz, V., Delard, C., Del Río, R. & Balzarini, M. (2020a).** Long-term effect of fertilisation on Stone Pine growth and cone production. *Annals of Forest Science*, N° 77. Pp: 69-78. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00978-6>
- Loewe-Muñoz, V., Balzarini, M., Delard, C., Del Río, R. & Alvarez, A. (2020b).** Inter-annual variability of Stone Pine cone yield in a non-native habitat. *New Forests*, 51(6): 1055-1068. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09774-6>
- Mutke, S., Calama, R., Gordo, J. & Gil, L. (2007).** El uso del pino piñonero como especie frutal en sistemas agroforestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, N° 22. Pp: 137-142.
- Mutke, S. (2020).** El pino piñonero en plantaciones agronómicas. *Foresta*, N° 77. Pp: 6-7.
- New Zealand Tree Crops Association (NZTCA). (2020)** Pine Nut. En: <https://treecrops.org.nz/crops/nut/pine-nut/pine-nut/> (Consulta: Mayo, 2020).
- ODEPA (2022).** Precios. Series de tiempo. En: <https://www.odepa.gob.cl/precios/series-de-tiempo> (Consulta: Febrero, 2022).
- Pardini, A. & Nori, M. (2011).** Agro-silvo-pastoral systems in Italy: Integration and diversification. *Pastoralism: Research, Policy and Practice*, 1(1): 26-36. <https://doi.org/10.1186/2041-7136-1-26>
- Peña, E. y Pedernera, P. (2004).** Silvicultura preventiva para combatir incendios forestales. *Chile Forestal*, N° 302. Pp: 12-14.
- Peterson, A. (2007).** Global warming, drought & Chinese imports shape an “Experiment in Agriculture” for Colorado. En: <http://ezinearticles.com/?Global-Warming-Drought-and-Chinese-Imports-Shape-an-Experiment-in-Agriculture-for-Colorado&id=674004> (Consulta: Abril, 2021).
- Pinoli. (2019).** Our Orchards. En: <https://pinoli.co.nz/pages/our-orchards> (Consulta: Febrero, 2022).
- Reisner, Y., De Filippi, R., Herzog, F. & Palma, J. (2007).** Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecological Engineering*, N° 29. Pp: 401-418. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.020>
- Sattout, E. & Faour, G. (2017).** Insights on the value chain and management practices of Stone Pine in Lebanon. In: Carrasquinho, I., Correia, A.C. and Mutke, S. (Eds). *Mediterranean Pine Nuts from forests and plantations*. CIHEAM. Options Méditerranéennes. Série A, Séminaires Méditerranéens, N° 122. Pp: 119-124.
- Schröder, K., Khaldi, A. & Hasnaoui, A. (2014).** Analyse de la chaîne de valeur “Pignons de Pin” en Tunisie. *Project Adaptation au changement climatique des politiques*. GIZ at DGF Tunisia, Tunis, 50 p.
- Sülüsoglu, M. (2004).** The management of villagers owned Stone Pine plantations in Turkey. Rome: *FAO Forestry Policy and Institutions, Working Paper Series* N°5. 18 p. En: <http://www.fao.org/docrep/008/j4821e/j4821e00.htm>. (Consulta: Abril, 2021).
- Tapia, B. (2021).** Boletín papa. ODEPA, 17p. En: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-la-papa-enero-2021> (Consulta: Abril, 2021).
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S., Volaire et al. (2020).** Challenges for drought assessment in the Mediterranean under climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>

**Trap, L. (1993).** Pinus pinea, update for Australia. Yearbook West Australian Nut and Tree Crops Association, Perth, N° 17. Pp: 6-8.

**Vanhanen, L. & Savage, G. (2013).** Mineral analysis of Pine Nuts (Pinus spp.) grown in New Zealand. Foods, N° 2. Pp: 143-150. <https://doi.org/10.3390/foods2020143>

**Apéndice 1.** Costos considerados en la evaluación económica.

<b>Actividad</b>	<b>(US\$/ha)</b>
Control malezas antes de plantación	89,7
Control malezas después de plantación	137,9
Control de malezas. Mantenimiento anual	117,6
Preparación de suelos	82,4
Plantación	327,3
Fertilización con la plantación	126,1
Fertilización en los años 5, 10 y 15	557,8
Fertilización en los años 20 y 25	1.637,1
Fertilización en los años 30, 35, 40, 45, 50 y 55	1.358,2
Fertilización en agroforestería años 1 a 8	242,4
Riego manual años 1 a 8	117,6
Riego por goteo	
• Instalación del sistema	1.764,7
• Operación anual y mantenimiento	235,2
Poda años 5, 10, 15 y 20	81,8
Poda en años 25, 30, 35, 40, 45, 50 y 55	56,1
Raleo año 25	117,6
Cosecha manual anual de conos	
• Años 8 a 15	572,0
• Año 30	500,0
• Año 45	750,0
• Año 60	750,0
Almacenamiento anual de conos desde año 8	2.660,0
Arriendo anual suelo	294,1
Gastos anuales de movilización	122,9
Administración anual	88,2
Gastos anuales básicos e imprevistos	88,2

**Apéndice 2.** Producción estimada de conos para dos intensidades de manejo.

<b>Edad (años)</b>	<b>Manejo mediana intensidad (Kg/ha)</b>	<b>Manejo alta intensidad (Kg/ha)</b>
6		187
7		936
8	159	1.497
9	795	1.871
10	1.273	2.433
11	1.591	2.807
12	2.068	3.369
13	2.386	3.743
14	2.863	2.246
15	3.182	2.246
16	1.591	4.492
17	1.591	2.695
18	3.818	2.695
19	1.909	5.240
20	1.909	3.144
21	4.454	3.144
22	2.227	5.284
23	2.227	3.171
24	4.454	3.171
25	1.146	3.115
26	1.146	1.869
27	2.782	1.869
28	1.391	4.530
29	1.391	2.718
30	2.782	2.718
31	1.391	4.813
32	1.391	3.398
33	4.091	3.398
34	2.046	5.663
35	2.046	3.398
36	4.910	3.398
37	2.455	6.795
38	2.455	4.077
39	5.728	4.077
40	2.864	7.588
41	2.864	4.553
42	6.137	4.553
43	3.069	7.588
44	3.069	4.553
45	6.450	4.553
46	3.225	7.588
47	3.225	4.553
48	3.450	4.553
49	3.225	7.588
50	3.225	4.553
51	6.450	4.553
52	3.225	7.588
53	3.225	4.553
54	3.450	4.553
55	3.225	7.588
56	3.225	4.553
57	6.450	4.553
58	3.225	7.588
59	3.225	4.553
60	6.450	4.553

**Apéndice 3.** Ingresos considerados en la evaluación económica para cada esquema de manejo.

Ingreso	Plantación con Manejo Mediana Intensidad (US\$/ha)	Plantación con Manejo Alta Mediana Intensidad (US\$/ha)	Agroforestal con Manejo Mediana Intensidad (US\$/ha)
Producción Cultivos			
• Papas años 1 y 2			3.445
• Avena para alimentación ovejas años 3 a 8			130
Producción de Conos			
• Año 15	4.950	5.823	4.950
• Año 30	4.328	7.048	4.328
• Año 45	10.034	11.805	10.034
• Año 60	10.034	11.805	10.034
Leña año 25	406	406	406
Trozas madera año 60	3.415	3.415	3.415



---

ARTÍCULO

## Migración Asistida de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch. Un Modelo para Salvaguardar el Potencial Adaptativo de una Especie Emblemática de los Bosques de Chile.

Roberto Ipinza Carmona<sup>1\*</sup>; Jorge González Campos<sup>2</sup>; María Paz Molina Brand<sup>2</sup>; Braulio Gutiérrez Caro<sup>2</sup>; Hernán Soto Guevara<sup>2</sup>; Laura Koch Zúñiga<sup>2</sup>; Rodrigo Hasbún Zaror<sup>3</sup>; Fernando Santibáñez Quezada<sup>4</sup>; Lilian Saavedra Paillao<sup>4</sup>; Carlos Magni Díaz<sup>4</sup>; Juan Celhay Schoelermann<sup>5</sup> y Santiago Barros Asenjo<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, sede Los Ríos, Chile;

<sup>2</sup>Instituto Forestal, sede Biobío, Chile;

<sup>3</sup>Universidad de Concepción, Chile;

<sup>4</sup>Universidad de Chile, Santiago, Chile;

<sup>5</sup>CMPC, Los Ángeles, Chile;

<sup>6</sup>Instituto Forestal, Gerencia I&D. Santiago, Chile.

\*Autor para correspondencia: roberto.ipinza@infor.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.605>

Recibido: 25.02.2024; Aceptado 23.3.2024

---

### RESUMEN

La *Araucaria araucana*, una especie emblemática de los bosques de Chile y Argentina, enfrenta una fuerte presión debido al cambio climático, lo que la ha predispuesto al daño foliar de la araucaria (DFA). Esta enfermedad afecta al 85% de las poblaciones chilenas y ha llevado a cambiar su estado de conservación a "en peligro de extinción" en la Cordillera de la Costa. Para conservar esta especie, se inició un programa de migración asistida, recolectando semillas de 458 individuos representativos de sus poblaciones en las Cordilleras de la Costa y Los Andes. Las semillas fueron cultivadas manteniendo la identificación familiar y se estableció una colección de plantas en 54 hectáreas distribuidas en seis unidades de conservación. Estas unidades, estructuradas como ensayos de progenie y procedencia, se instalaron en áreas de acogida tanto dentro como fuera de la distribución natural de la araucaria. Las áreas de acogida fueron seleccionadas mediante proyecciones climáticas para los próximos 50 y 70 años, garantizando condiciones idóneas para el desarrollo de la araucaria y minimizando el estrés bioclimático, que incluye estrés térmico por temperaturas extremas y estrés hídrico estival. El objetivo del programa de migración es salvaguardar el potencial evolutivo de la araucaria y establecer poblaciones base para futuras iniciativas de restauración utilizando el material genético rescatado.

**Palabras clave:** Cambio climático, ensayos de progenie-procedencia, genómica, presión de selección, variación genética adaptativa

### SUMMARY

The *Araucaria araucana*, an emblematic species of the forests of Chile and Argentina, is facing significant pressure due to climate change, which has predisposed it to Araucaria foliar damage (AFD). This disease affects 85% of Chilean populations and has led to a change in its conservation status to "endangered" in the Coastal Range. To conserve this species, an assisted migration program was initiated, collecting seeds from 458 representative individuals from populations in the Coastal and Andes Ranges. The seeds were cultivated while maintaining family identification and resulted in a collection of plants established over 54 hectares across six conservation units. These units, structured as progeny and provenance trials, were installed in reception areas both within and outside the natural distribution of Araucaria.

The reception areas were selected based on climate projections for the next 50 and 70 years, ensuring ideal conditions for the development of Araucaria and minimizing bioclimatic stress, which includes thermal stress from extreme temperatures and summer water stress. The goal of the migration program is to safeguard the evolutionary potential of Araucaria and establish base populations for future restoration initiatives using the rescued genetic material.

**Key words:** Climate change, progeny and provenance trials, genomics, selection pressure, adaptive genetic variation

---

## 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 estas 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 e 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 como en los procesos y funciones ecosistémicas asociados a estas especies (Ackerly *et al.*, 2010).

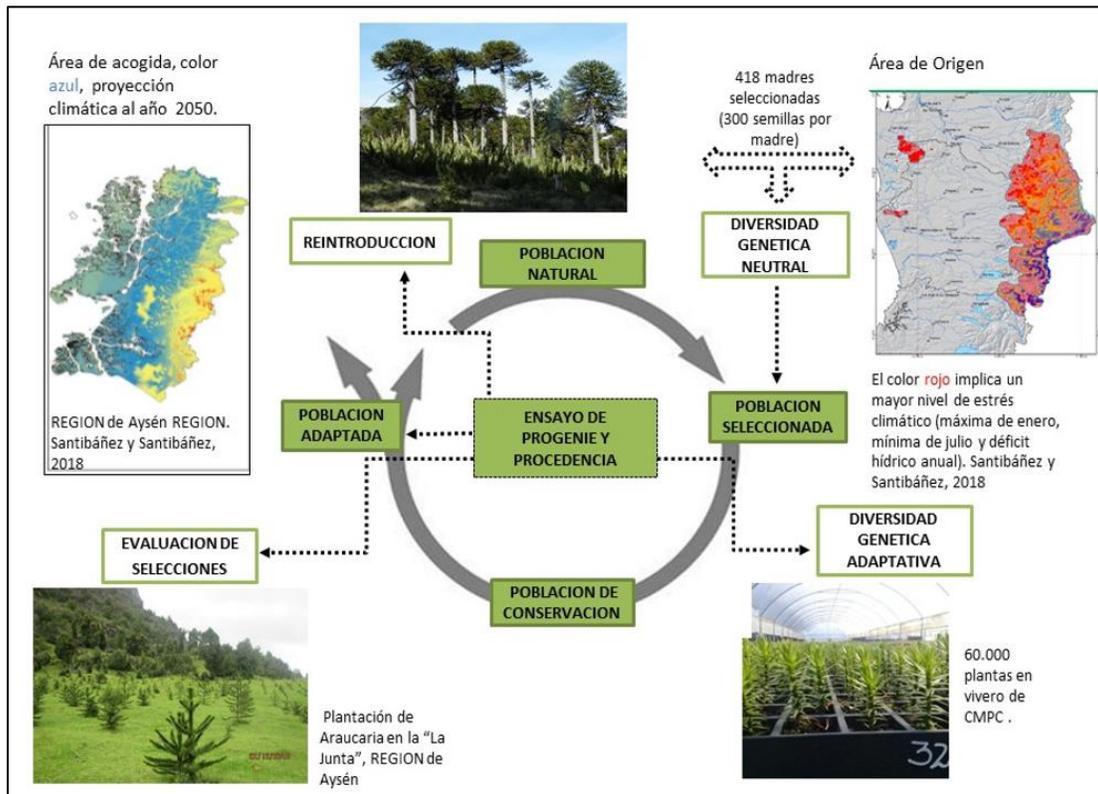
En el caso particular de Chile, se prevén cambios significativos en las décadas que vienen. El alza que ha venido teniendo la temperatura parece haberse acelerado a partir de los años 80 y, particularmente, a partir de los años 2000 (<https://www.cr2.cl/>). La velocidad de estos cambios es muy superior 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 afectaban 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 (DFA).

Como 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. Esto se concretó a través de un proyecto apoyado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) financiando el proyecto Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF), apoyado también por CMPC, y 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 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 debieran expresar 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 DFA u otras enfermedades 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, la *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 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 *ex situ* 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 km<sup>2</sup>, 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). Esto se proyecta de acuerdo con estándares del IPCC, y se conforma un índice de estrés integral para el 2050 y 2070 (Santibáñez & 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 costera. 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 de largo (LS) y ancho, para esta última 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 el 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, en Chile. La secuenciación se realizó en el 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 (GIS), un Análisis de Varianza Molecular (AMOVA) usando un modelo de alelos infinitos basados en  $F_{ST}$  (Índice de fijación, medida de la diferenciación de la población debido a la estructura genética), 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 centímetros cúbicos 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, 2019).

### 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 del ensayo, una vez aprobado, se procedió a marcar la superficie efectiva del sitio.

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 normalmente 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 Boronatro Calcita, para sustituir la baja proporción de Boro propia de los suelos costeros como 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

y luego, 2, 3 y 5 años sucesivamente, 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 en altitud en la Cordillera de Los Andes, con índices mínimos de estrés integral, las cuales servirán como áreas de acogida para araucaria.

Estas áreas van bajando en altitud a medida que se avanza hacia el sur, de modo que, a partir de 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  $\alpha = 0.05$ .

### Evaluación Diversidad Genética Neutral

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

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 ADCP 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.

**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  $\mu$  (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 $\pm$ 0,29 c	1,24 $\pm$ 0,08 c	1,35 $\pm$ 0,12 abc	3,49 $\pm$ 0,53 d	285
PN Nahuelbuta	4,11 $\pm$ 0,36 a	1,33 $\pm$ 0,10 a	1,36 $\pm$ 0,11 ab	3,95 $\pm$ 0,64 bc	256
RN Ralco	3,83 $\pm$ 0,35 bc	1,22 $\pm$ 0,11 c	1,30 $\pm$ 0,13 cb	3,53 $\pm$ 0,62 d	276
RN Las Nalcas	3,99 $\pm$ 0,26 ab	1,26 $\pm$ 0,08 bc	1,30 $\pm$ 0,09 cde	4,21 $\pm$ 0,68 ab	227
Lonquimay	3,60 $\pm$ 0,41 c	1,24 $\pm$ 0,08 bc	1,24 $\pm$ 0,07 de	3,59 $\pm$ 0,68 cd	292
RN Malalcahuello	3,80 $\pm$ 0,40 bc	1,21 $\pm$ 0,10 c	1,27 $\pm$ 0,12 cde	3,60 $\pm$ 0,72 cd	276
RN Huerquehue	3,94 $\pm$ 0,19 ab	1,23 $\pm$ 0,09 bc	1,24 $\pm$ 0,07 de	4,06 $\pm$ 0,54 abc	259
PN Conguillío	3,92 $\pm$ 0,43 ab	1,25 $\pm$ 0,11 bc	1,30 $\pm$ 0,19 bcd	4,00 $\pm$ 0,89 abc	261
PN Villarrica	4,08 $\pm$ 0,40 a	1,30 $\pm$ 0,09 ab	1,39 $\pm$ 0,09 a	4,39 $\pm$ 0,63 a	239
Cruzaco	3,76 $\pm$ 0,17 bc	1,23 $\pm$ 0,09 bc	1,21 $\pm$ 0,07 e	3,83 $\pm$ 0,63 bcd	254
Icalma	3,76 $\pm$ 0,26 bc	1,26 $\pm$ 0,08 abc	1,21 $\pm$ 0,08 e	3,90 $\pm$ 0,69 bcd	249
Marimenuco	3,75 $\pm$ 0,36 bc	1,25 $\pm$ 0,10 bc	1,21 $\pm$ 0,09 de	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 $\pm$ 0,3 abc	11 $\pm$ 0,5 a	95 b	4,9 $\pm$ 0,3 c	22,4 $\pm$ 0,6 a	83,7 $\pm$ 2,8 ab
Villas Las Araucarias	15,6 $\pm$ 0,3 a	12,6 $\pm$ 0,7 b	78 a	5,1 $\pm$ 0,3 c	22,7 $\pm$ 0,8 a	86,9 $\pm$ 2,5 abc
RN Ralco	14,1 $\pm$ 0,1 bcd	11,9 $\pm$ 0,4 ab	31 abc	4,0 $\pm$ 0,2 a	16,2 $\pm$ 0,3 b	93,9 $\pm$ 0,8 c
RN Las Nalcas	13,6 $\pm$ 0,2 bd	11,7 $\pm$ 0,5 ab	38 abc	4,5 $\pm$ 0,2 ab	16,9 $\pm$ 0,5 b	90,54 $\pm$ 2,04 ac
Lonquimay	13,1 $\pm$ 0,39 bcde	10,15 $\pm$ 0,70 ab	10 ab	4,6 $\pm$ 0,31 a	14 $\pm$ 0,67 b	88,88 $\pm$ 3,75 abc
RN Malalcahuello	13,85 $\pm$ 0,22 bcd	11,9 $\pm$ 0,53 ab	40 abc	4,2 $\pm$ 0,26 ab	16,7 $\pm$ 0,52 b	90,56 $\pm$ 1,65 abc
PN Conguillío	13,81 $\pm$ 0,26 bcd	11,8 $\pm$ 0,53 ab	33 abc	4,1 $\pm$ 0,20 a	16,1 $\pm$ 0,45 b	90,48 $\pm$ 1,41 abc
Marimenuco	13,22 $\pm$ 0,36 bcde	10,07 $\pm$ 1,16 a	70 abc	5 $\pm$ 0,5b c	18,8 $\pm$ 1,2 ab	88,02 $\pm$ 3,75 abc
Cruzaco	14,98 $\pm$ 0,35 ac	11,7 $\pm$ 0,86 ab	44 abc	4 $\pm$ 0,4 ab	17,6 $\pm$ 0,6 b	87,90 $\pm$ 2,77 abc
Icalma	13,24 $\pm$ 0,18 d	10,6 $\pm$ 0,54 a	42 abc	4,27 $\pm$ 0,2 ab	16,5 $\pm$ 0,4 b	88,18 $\pm$ 1,92 ab
PN Huerquehue	13,19 $\pm$ 0,23 de	10,8 $\pm$ 0,61 a	40 abc	4,8 $\pm$ 0,3 ab	16,8 $\pm$ 0,6 b	91,27 $\pm$ 1,44 abc
PN Villarrica	12,16 $\pm$ 0,21 e	10,5 $\pm$ 0,50 a	38 abc	4,3 $\pm$ 0,2 ab	15,3 $\pm$ 0,5 b	83,63 $\pm$ 1,66 b
$\mu \pm$ 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 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, 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, 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 5.341 plantas quedando un total de 12.340 plantas.

En el primer año de crecimiento (Cuadro 2) se puede ver como las plantas pertenecientes a la población localizada en el Parque Nacional Villarrica presentan el menor crecimiento en altura. Esto probablemente se deba al origen de esta población, la más austral de la distribución natural de la especie y cuyas condiciones climáticas, principalmente temperatura (mes cálido y frío), distan mucho del lugar de viverización, comuna Yumbel. Quizás esta sea la causa de la menor supervivencia (cantidad de plantas vigorosas/semillas germinadas/procedencias) de esta población.

Las poblaciones costeras, Parque Nacional Nahuelbuta y Villa Las Araucarias, presentan las alturas mayores, pero no existe una relación entre el tamaño de las semillas y la altura de planta, ya que las semillas más grandes corresponden a la población Parque Nacional Villarrica y sus plantas alcanzan menores altura.

Con relación a la arquitectura (Presencia de ramas, Largo de ramas y Largo total), existe una tendencia en las poblaciones costeras de presentar una mayor cantidad de ramas, en comparación a las poblaciones andinas, esto continúa siendo materia de investigación, aunque posiblemente es un carácter adaptativo.

Pese a que las poblaciones costeras presentaron rápido crecimiento, especialmente en el desarrollo de ramas y largo total, su supervivencia fue inferior en relación a las poblaciones andinas.

### Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

A la fecha se han seleccionado 6 sitios tanto dentro del área de acogida, como fuera de esta (Cuadro 3).

### 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  $h^2 = 0,16 \pm 0,18$ .

**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 grados	Longitud grados
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
Predio Santa Elena	Privada	4,3	-45,113125	-72,271811

## 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 ocupará 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, en el 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  $311 \pm 19,1$  semillas/kg (año 2013) y  $406 \pm 12,0$  semillas/kg (año 2014), para la población de Villa Las Araucarias. En este estudio, para esta localidad, se obtuvo un valor  $294 \pm 63,37$  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 *et al.*, 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 géneros *Nothofagus* y *Austrocedrus*, lo que podría estar explicando estas diferencias en araucaria.

Troncoso (2015) informó 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 siembra, 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, 2019).

### Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

Se han establecido 6 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.

## RECONOCIMIENTOS

Se agradece a la Corporación Nacional Forestal de Chile, en especial a sus profesionales Aida Baldini, Mónica Gonzalez, Julio Figueroa, Nefalí Soto y Leonardo Araya. Al Instituto Forestal que a través del grupo de Conservación y de Mejora Genética prestó su apoyo técnico y a SIMEF por el apoyo financiero. 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, Bosques Arauco y, en especial, a CMPC, por su incondicional apoyo y compromiso en el proyecto de Migración Asistida. Igualmente, a todos los administradores y guardaparques del Sistema Nacional de Áreas Silvestre Protegidas del Estado con presencia de araucaria administrados por 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. et al. (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. et al. (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.
- 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), Pehuén, Piñónero, 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, J. & Koch, L. (2021).** Evaluación de parámetros morfológicos y fisiológicos en semillas de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch, Cosecha Temporada 2018. En: Ipinza, R. y 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>
- 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, LA. (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>
- Martín, M., Mattioni, C., Lusini, I., Molina, J., Cherubini, 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. y 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 in vitro. 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. et al. (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

## Turberas y cosecha de *Sphagnum* en la región de Aysén, Chile.

Jaime Salinas Sanhueza<sup>1\*</sup>; Greta Gaudig<sup>2</sup>; Matthias Krebs<sup>2</sup>; Iván Moya Navarro<sup>1</sup> & Fernán Silva Labbé<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal, Sede Patagonia, Coyhaique, Chile.

<sup>2</sup>Centro Greifswald Mire, Alemania.

<sup>3</sup>Servicio Agrícola y Ganadero, Coyhaique, Chile.

\*Autor para correspondencia: [jsalinas@infor.cl](mailto:jsalinas@infor.cl)

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.606>

Recibido: 15.03.2024; Aceptado 20.04.2024

---

### RESUMEN

Las turberas son ecosistemas clave para el almacenamiento de carbono, regulación del agua y mitigación del cambio climático. En Chile, se encuentran principalmente en el sur y la región austral. El musgo *Sphagnum*, recolectado en Chile desde hace 20 años, tiene una alta capacidad de retención de agua y se exporta principalmente a Asia para el cultivo de orquídeas y horticultura, generando ingresos significativos para los productores rurales. Sin embargo, la cosecha excesiva de *Sphagnum* puede afectar el suministro de agua, el ciclo del carbono y la integridad ecológica de las turberas. En la región de Aysén, donde la recolección de *Sphagnum* comenzó hace 10 años, es crucial evitar prácticas de extracción insostenibles. Para discutir una recolección sostenible, se organizó una excursión de campo con expertos del Instituto Forestal de la Sede Patagonia, del Servicio Agrícola y Ganadero (Coyhaique) y científicos del Greifswald Mire Center (Alemania). Se investigaron turberas en Aysén para evaluar nutrientes, vegetación y estratigrafía. Es vital distinguir el tipo de turbera para evaluar la sostenibilidad de la recolección. En turberas dominadas por *Sphagnum*, la extracción debe ser superficial (no más de 10 cm) para permitir la regeneración y evitar inundaciones. Durante la visita, se discutieron opciones de paludicultura, que implica el uso productivo de turberas húmedas para preservar el carbono y cultivar biomasa de *Sphagnum*. La paludicultura busca sostener ingresos mediante la recolección de biomasa sin dañar el recurso natural. Se necesita más investigación para determinar el potencial de esta práctica.

**Palabras clave:** Paludicultura, manejo sustentable.

### SUMMARY

Peatlands are crucial ecosystems for carbon storage, water regulation, and climate change mitigation. In Chile, they are primarily found in the southern and southernmost regions. *Sphagnum* moss, collected in Chile for the past 20 years, has a high water retention capacity and is mainly exported to Asia for orchid cultivation and horticulture, generating significant income for rural producers. However, excessive *Sphagnum* harvesting can impact water supply, carbon cycles, and the ecological integrity of peatlands. In the Aysén region, where *Sphagnum* collection began 10 years ago, it is crucial to avoid unsustainable extraction practices. To discuss sustainable harvesting, a field excursion was organized with experts from the Forest Institute of the Patagonia Headquarters, the Agricultural and Livestock Service (Coyhaique), and scientists from the Greifswald Mire Center (Germany). Peatlands in Aysén were investigated to assess nutrients, vegetation, and stratigraphy. It is vital to distinguish the type of peatland to evaluate harvesting sustainability. In peatlands dominated by *Sphagnum*, extraction must be superficial (no more than 10 cm) to allow regeneration and prevent flooding. During the visit, paludiculture options were discussed, which involve the productive use of wet and rewetted peatlands to preserve carbon reserves and cultivate *Sphagnum* biomass. Paludiculture aims to sustain income through biomass harvesting without damaging the natural resource. Further research is needed to determine the potential of this practice.

**Key words:** *Beilschmiedia miersii*, root length, root protection zone, root architecture

---

## INTRODUCCIÓN

Las turberas en Chile cubren aproximadamente el 2,5% de la superficie terrestre (1,9 millones de hectáreas) (UNEP, 2022) y casi el 26% de ellas se encuentran en la región de Aysén (Rodríguez Martínez, 2015). El área de turberas del musgo pompón (*Sphagnum magellanicum*) en la Región Aysén es de 15.240 ha (Domínguez y Martínez, 2021) (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Área de turberas de *Sphagnum* en la región Aysén

Provincia	Comuna	Superficie (ha)	Participación (%)
Aysén	Aysén	2.526	16,6
	Cisnes	1.494	9,8
	Guaitecas	431	2,8
Coyhaique	Coyhaique	301	2,0
	Lago verde	564	3,7
General Carrera	Chile Chico	96	0,6
	Ibáñez	33	0,2
Capitán Prat	Cochrane	2.682	17,6
	O'Higgins	4.338	28,5
	Tortel	2.775	18,2
<b>Total</b>		<b>15.240</b>	<b>100,0</b>

El origen de las turberas en Aysén comenzó en el Holoceno, aproximadamente 15.000 a 12.000 años AP, que fue un período cálido y seco que marcó el final de la era glacial en la Patagonia (Holz *et al.*, 2012). Después de que la capa de hielo patagónica formara valles glaciares en forma de U y permitiera que los glaciares drenaran hacia el océano, estos valles fueron llenados por materiales sedimentarios transportados por poderosos ríos (Rodríguez Martínez, 2015). Los sumideros se llenaron con suelos turbios bajo paludificación o terrenalización antes de que pudieran desarrollarse pantanos (turberas) elevados. Casi un tercio de las turberas de Aysén están asociadas a las cuencas de los ríos regionales más grandes; Baker y Pascua. La presencia de ecosistemas de turberas a lo largo de estas cuencas fluviales aumenta a lo largo de una secuencia longitudinal este-oeste, siguiendo el drástico gradiente pluviométrico oeste-este en ambas cuencas. Rodríguez Martínez (2015) dividió los ecosistemas de turberas de secano en dos grupos; turberas elevadas y en blanco. La investigación sobre turberas en la región Aysén comenzó hace solo unos años, por ejemplo, Pfeiffer *et al.* (2010) mencionando suelos orgánicos por primera vez en las cuencas Baker y Pascua; Rodríguez Martínez (2015) dando información sobre su origen, hidrología, geomorfología, estratigrafía, ecología y capacidades de almacenamiento de carbono y agua; y también Rodríguez Martínez (2015) investigando la clasificación hidrogeomórfica de los ecosistemas de turberas.

Limitada por el archipiélago al norte y al oeste, por los Campos de Hielo al sur y por el frío desierto de la pampa argentina al este, la región de Aysén permaneció aislada. El desarrollo de la región comenzó a principios del siglo 20, ya que la ciudad de Puerto Aysén fue fundada en 1927. Importante para el desarrollo de la región fue la construcción de la Carretera Austral, que comenzó en 1976 en Puerto Montt dirigiéndose hacia el sur y terminando en el poblado de Villa O'Higgins. La carretera daba acceso a los recursos naturales y condujo a la extracción de madera valiosa de Ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron uviferum*), una conífera altamente adaptada a las condiciones de anegamiento, que crece en hábitats muy húmedos.

Se informa que la explotación de estos árboles condujo a un excedente de agua que promueve la expansión de *S. magellanicum* y el desarrollo del pomponales, lo que también se describe para la isla Grande de Chiloé, donde las comunidades de *Sphagnum*, en particular con *S. magellanicum*, han reemplazado los antiguos ecosistemas forestales.

Los llamados 'pomponales' se encuentran comúnmente en la Isla Grande de Chiloé y también en las áreas continentales de la región de Los Lagos. Deben su origen a las intensas actividades de corte de madera y

despeje por fuego que tuvieron lugar a lo largo de los últimos dos siglos en áreas con suelos poco drenados de arcilla mineral húmeda, principalmente de origen glacial (labranza) y, por lo tanto, poseen una capa de turba poco profunda bajo una capa de *Sphagnum* productora de turba (León y Oliván, 2014). Este tipo es común en las llanuras aluviales y típico de los promontorios de los glaciares.

Estas áreas en la región de Los Lagos y en particular en Isla Grande de Chiloé fueron el foco de la recolección de *Sphagnum* con fines hortícolas con un creciente interés comercial en los últimos 20 años. La recolección insostenible de *Sphagnum* llevó a un agotamiento de este recurso en muchos lugares de la región de Los Lagos (Vacarezza, 2012).

En las turberas de *Sphagnum* de Aysén, se recolecta biomasa desde la década de 1990. Oficialmente se recolectaron 4.000 – 5.000 t por año en los últimos tres años en áreas de 2 a 50 ha, con 800 ha en total de turberas. Los recolectores juntan y secan *Sphagnum* en el campo antes de que el material sea colectado y exportado por alrededor de diez empresas, que se encuentran principalmente en Santiago de Chile.

Para controlar la recolección de *Sphagnum* el Gobierno implementó el decreto de recolección Decreto N° 25 de 2019. Desde 2011 se prueba el método de restauración canadiense (Quinty y Rochefort, 2003), pero la regeneración de la cubierta de *Sphagnum* a menudo es muy lenta (Domínguez Díaz *et al.*, 2022).

En el contexto descrito, este trabajo busca evaluar la sostenibilidad de la cosecha de *Sphagnum* y proporcionar recomendaciones para la revisión del Decreto Supremo N° 25, si procede, especialmente en lo que respecta a la aceleración del rebrote de *Sphagnum* después de la recolección, métodos para asegurar un alto crecimiento del musgo de larga duración y posibilidades de paludicultura de *Sphagnum* en la región de Aysén.

## MATERIAL Y MÉTODO

### Prospección de Predios Potenciales para Cultivo

Para llevar a cabo esta primera etapa de prospección del sitio, se trabajó en conjunto un equipo del Instituto Forestal de la Sede Patagonia y el Servicio Agrícola y Ganadero (Coyhaique). El equipo técnico del SAG tiene conocimiento de las turberas de la región y aprovechó su especialización en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Para las investigaciones se seleccionaron áreas con diferentes turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén con diferentes montos de precipitación anual. Posteriormente se realizó una primera visita de aproximación a estos sitios con el fin de caracterizarlos y evaluar preliminarmente sus condiciones para su posterior validación por parte de los asesores alemanes. Se visitaron turberas en el norte, centro y sur de la región y se priorizaron 4 sitios para una evaluación adicional.

### Fase de Campo

El equipo técnico consideró y contactó a dos expertos internacionales para su participación en el proyecto. Los investigadores Dr. Greta Gaudig y Matthias Krebs del Centro Greifswald Mire en Alemania, han estado investigando durante más de 20 años sobre la ecología, el crecimiento, el establecimiento y el rebrote después de la cosecha del *Sphagnum*, principalmente relacionados con la paludicultura, con varias publicaciones científicas relacionadas. Ambos expertos viajaron a Chile y, junto con el equipo nacional, compartieron aspectos técnicos, discutieron y evaluaron opciones de recolección sustentable y tuvieron una primera mirada al potencial de paludicultura de *Sphagnum* en la región de Aysén.

Las turberas visitadas se caracterizan por su ubicación, condiciones climáticas, vegetación, núcleos de turba y extensión de la recolección de *Sphagnum*. Se registró la vegetación y la estratigrafía durante la visita de campo, y se tomó muestras para análisis de elementos de biomasa (capa superficial de *Sphagnum* de 0-1 cm = capitula), turba (cerca de la superficie con bajo grado y más profundo con mayor grado de descomposición) y agua con mediciones de los valores de pH del agua y conductividad eléctrica. Los

análisis de las muestras fueron analizados en laboratorios del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Se incluyó datos adicionales de las referencias disponibles en la caracterización. A partir de esto, se buscó identificar el tipo de turbera y el impacto de la recolección de *Sphagnum* en la turbera misma. En algunos casos, más datos sobre el relieve en la superficie y del subsuelo mineral, incluidas las profundidades de turba, la hidrología y la biogeoquímica, serían útiles para verificar nuevas impresiones.

En la etapa de campo se planificaron visitas a terreno a los predios anteriormente preseleccionados con el SAG. En estas visitas participaron los asesores, el equipo técnico y asociados. En cada sitio se discutió sobre la potencialidad de establecer el cultivo del musgo y se realizarán evaluaciones de al menos las siguientes variables: (a) profundidad estratigráfica con barreno tipo ruso; (b) pH al agua; (c) materia orgánica a los 15 y 30 cm; (d) nivel freático; (e) composición botánica estimada y (f) nivel de perturbación, entre otros.

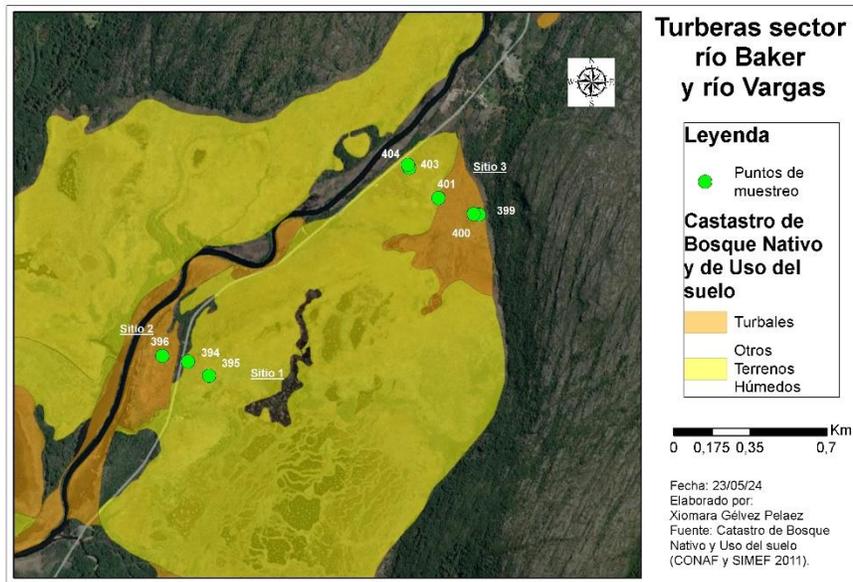
## RESULTADOS Y DISCUSION

### Turberas de Lago Vargas, Comuna de Tortel

El clima en la zona de Lago Vargas es frío-húmedo con temperaturas medias anuales de 11°C y con precipitación media anual de 1.300 mm, que se distribuye uniformemente (poco más en invierno), Rodríguez Martínez (2015) describe la zona de Lago Vargas como más o menos prístina, a juzgar por su hidrología, vegetación y estructura. La periferia del valle del Lago Vargas está demarcada por bordes y laderas, abundantes bosques con especies nativas como Coigue (*Nothofagus betuloides*) y ciprés de las Guaitecas. En el centro, aparecen turberas de musgos *Sphagnum* levantados y parches de pequeños bosques semidensos, que crecen sobre bancos de arena depositados en el pasado por el río Baker.

La parte central de la turbera tiene muchos apozamientos poco profundos colonizados con montículos de musgos *Sphagnum* y la *Juncaginaceae* - *Tetroncium magellanicum*. En las turberas de Lago Vargas se encuentran tres especies de *Sphagnum*: *S. magellanicum* (que se cosecha), así como *S. fimbriatum* y *S. falcatulum* en condiciones más minerotróficas en los márgenes. La capa de turba tiene hasta 2,3 m de espesor.

En las turberas de Lago Vargas fueron investigados tres sitios con ocho parcelas en total (**Figura 1**). Los sitios 1 y 2 son de un propietario/recolector, el sitio 3 de otro propietario. En el sitio 1 y 2, el ciprés se ha cortado de 2004 a 2019, antes de que comenzara la recolección de *Sphagnum* en 2018/2019. Recientemente, alrededor de 12.000 bolsas cada una con 25 kg de material húmedo de *Sphagnum* se recolectan por hectárea durante una temporada de septiembre a marzo. Con una horquilla modificada, se retira manualmente las hebras (césped) de *Sphagnum* hasta 25-30 cm de profundidad (después de las mediciones efectuadas) en lo más cercano a la carretera, mientras que el 30% en la distancia mayor se deja intacto (sitio 1). El musgo aún húmedo es transportado en bolsas hasta el borde de la turbera por un sistema de carro de arrastre manual, de allí a las instalaciones de secado. Los musgos secos son transportados desde Puerto Chacabuco a Puerto Montt por vía marítima en barcaza. El recolector reconoció un mejor repoblamiento (crecimiento) de *Sphagnum* al recolectar un patrón (7 m de cosecha, dejando 3 m intacto).



**Figura 1.** Parcelas de investigación (números de los puntos GPS de los diferentes sitios 1-3 en la turbera 1 en Lago Vargas)

- Sitio 1 en la Turbera 1 (Zona Lago Vargas)

**Cuadro 2.** Caracterización del sitio 1 en turbera 1 (Lago Vargas)

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1. Margen	394	4.33 4.39	14 26	
Vegetación	<i>Sphagnum falcatulum</i> , <i>S. magellanicum</i> , <i>S. fimbriatum</i> , <i>Pilgerodendron uviferum</i> , <i>Nothofagus antarctica</i> , <i>Empetrum rubrum</i> , <i>Carex spec.</i>			
Cosecha	Desde 2018			
Observaciones	Suelo (rojo) impermeable con hierro			
2. Centro (área intocada)	395	4.3	11	
Vegetación	<i>Pilgerodendron uviferum</i> (mucho tallo muerto), <i>Nothofagus antarctica</i> , <i>Juncus sp.</i> , <i>Schoenoplectus sp.</i> , <i>Marsippospermum multiflorum</i> , <i>Empetrum rubrum</i> , <i>Gaultheria mucronata</i> , <i>Carex sp.</i> , líquenes: <i>Cladonia</i> , <i>Usnea</i> ; 100 % <i>Sphagnum magellanicum</i>			
	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de turba</b>	<b>Grado de descomposición (de Von Post 1924)</b>	<b>Observaciones</b>
Núcleo	0 – 20 cm	Césped de <i>Sphagnum</i>		
	20 – 69 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H2	
	> 69 cm	Subsuelo mineral (arena)		

- Sitio 2 en la Turbera 1 (Zona Lago Vargas)

**Cuadro 3.** Caracterización del sitio 2 en la turbera 1 (Lago Vargas)

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1. Centro	396	3.86 4.14	41 26	20
Núcleo	Profundidad	Tipo de turba	Grado de descomposición (de Von Post 1924)	Observaciones
	0 – 10 cm	Césped <i>Sphagnum</i>		
	10 – 15 cm	<i>Sphagnum</i> turba (negra)	H2	Capa de remanentes de incendios
	15 – 26 cm	<i>Sphagnum</i>	H2	sección <i>Cymbifolia</i> , algo como estratificación en planos/bandeja
	26 – 110 cm	Turba de raíces <i>Sphagnum-Sphagnum</i> y turba	H7-8	Componentes de sedimentos de aguas abiertas (gyttja), algo de madera y carbón
	> 110 cm	Subsuelo mineral limo arenoso		

El sitio 2 está situado al lado del río, próximo a la carretera. Esta parte de turberas está más seca que al otro lado de la carretera. Más montículos indican mayores fluctuaciones en el nivel freático. Las inundaciones tres veces al año, según lo descrito por el propietario/recolector, no eran comprensibles mediante la extracción de muestras en el centro (parcela 396), ya que no se encontraron restos minerales en la turba.

En esta parte de turberas, la cantidad de *Sphagnum* recolectado es mucho menor y los musgos eran más compactos y más atractivos para la industria, pero más difíciles de recolectar debido a la cubierta más densa de arbustos de *Ericaceae*.

- Clasificación de la Turbera 1 en la Zona de Lago Vargas

*S. magellanicum* domina la vegetación, mientras que *S. fimbriatum* solo ocurre en los márgenes. Las capas superficiales de turba consisten principalmente en *Sphagnum*, que solo se descompone ligeramente (H1-4). En capas más profundas se encontró turba de *Sphagnum* más descompuesta en parte con raíces o algo de madera. Rodríguez Martínez (2015) describió tal sitio como una turbera levantada. En los puntos investigados el camino se construyó a través de la turbera lo que influye en su hidrología; la parte hacia el río era más seca que la otra parte.

La biomasa de *Sphagnum* se recoge a ambos lados de la carretera. La eliminación de la biomasa de *Sphagnum* (o incluso más profunda) conduce a la pérdida del acrotelmo como capa autorreguladora (hidrológica).

Como resultado, el agua ya no se puede retener en la misma medida que antes y el agua drena más rápido hacia el río adyacente en el lado occidental de la carretera. Además, el flujo de agua de las partes más altas de las turberas está severamente restringido por la carretera. Las condiciones son más secas que en condiciones naturales e intactas, el rebrote de *Sphagnum* es bajo y el sistema de turberas podría degradarse aquí.

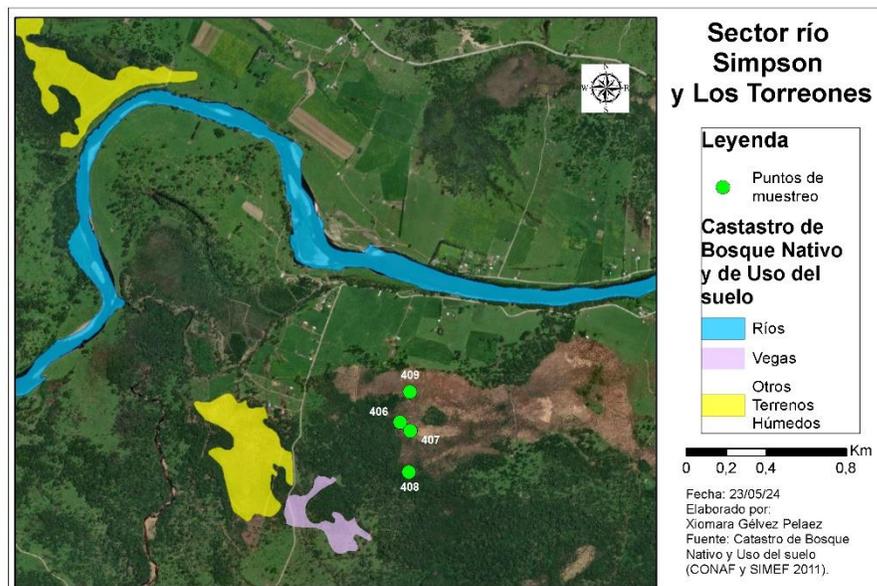
La inundación regular de las turberas por el río debería haber dejado restos minerales, pero no se encontraron en la turba. La situación al otro lado y al este de la carretera es diferente. Aquí el camino parece represar el agua proveniente principalmente de la lluvia y las montañas adyacentes hasta cierto punto, lo que resulta en condiciones mucho más húmedas. La disponibilidad de agua se ve condicionada por la tala o quema de ciprés, lo que reduce la evaporación y, por lo tanto, la pérdida de agua. Incluso si la capa superior de *Sphagnum* también se eliminó aquí, volvería a crecer en unos pocos años, si la biomasa fuera sólo recolectada a poca profundidad (~ 15 cm) y se evitara la inundación de la capa residual.

### Turberas en la Comuna de Aysén

La comuna de Aysén abarca 3 millones de hectáreas. Puerto Aysén tiene un clima oceánico con altas precipitaciones durante todo el año en más de 200 días al año y precipitación media anual de 2.240 mm. La temperatura media en verano es de 12,2 ° C, la temperatura media de invierno 6,7 ° C (Dirección Meteorológica de Chile, 2016). Se visitaron tres turberas en esta comuna (turberas 2, 4, 5).

- *Turbera 2 en la Comuna de Aysén*

La turbera 2 está situada a unos 19 km al este de Puerto Aysén, directamente cerca del Río Simpson. Parece llenar una depresión, posiblemente una antigua rama del río que se ha convertido en una turbera. En el borde se utiliza para el pastoreo de ganado. Además, un agricultor está recolectando biomasa de *Sphagnum*.



**Figura 2.** Parcelas de investigación (números de los puntos GPS) en la turbera 2 cerca del Río Simpson, comuna de Aysén.

**Cuadro 4.** Caracterización de la turbera 2, Cymb = sección Cymbiofolia, Acut = sección Acutifolia de especies de *Sphagnum*

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1.	406	5.06	28	8
vegetación	<i>Juncus effusus</i> , <i>Oxycoccus</i> sp., helecho ( <i>Blechnum</i> sp.), 2 <i>Ericaceae</i> , <i>Sphagnum lescurii</i> , <i>Sphagnum magellanicum</i> , <i>S. cuspidatum</i> , líquenes y tocones de árboles			
núcleo	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de turba</b>	<b>Grado de descomposición (de Von Post 1924)</b>	<b>Observaciones</b>
	0 – 6 cm	<i>Sphagnum</i> raíces, Cymb + Acut/Cusp turba	H2-3	Hoja de <i>Nothofagus</i>
	6 – 45 cm	Turba de raíces	H6-7	12 cm carbón muy compacto desde ~20 cm arena, raíces que decrecen hacia abajo
	> 45 cm	Subsuelo mineral: arena		gyttja, raicillas limoso
2. Mitad del transecto	407	4,87	27	5
vegetación	<i>Juncus effusus</i> , fern ( <i>Blechnum</i> sp.), <i>Ericaceae</i>			
observaciones	Recién cosechado (abril 2022), muchas fecas de vacas			
núcleo	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de turba</b>	<b>Grado de descomposición (de Von Post 1924)</b>	<b>Observaciones</b>
	0 – 6 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H2	
	6 – 12 cm	Turba de Raíces <i>Sphagnum</i>	H4	raíces, ~35 cm carbón
	> 12 cm	Turba de Raíces	H6-7	arena
3. Borde cerca del bosque	408			
vegetación	No hay <i>Sphagnum</i> , por pendiente en el bosque alejada de la turbera, con canales de drenaje natural			
núcleo	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de turba</b>	<b>Grado de descomposición (de Von Post 1924)</b>	<b>Observaciones</b>
	0 – 100 cm	Turba de raíces	H8	~60 cm: 5 cm arena
4.	409	4.4	23	
vegetación	<i>Sphagnum magellanicum</i> (100%), <i>Juncus effusus</i> (no en montículos), <i>Carex</i> spec.			
muestreo	<i>Sphagnum</i> y turba (Capitula, 5-10 cm)			
Núcleo	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de turba</b>	<b>Grado de descomposición (de Von Post 1924)</b>	<b>Observaciones</b>
	0 – 4 cm	<i>Sphagnum cesped</i>		
	4 – 15 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H2	
	15 – 22 cm	Turba de <i>Sphagnum</i> y raíces	H6	22 + 30 cm carbón
	22 – 68 cm	Turba de raíces	H6-7	arena
	> 68 cm	Subsuelo mineral: arena		Gyttja



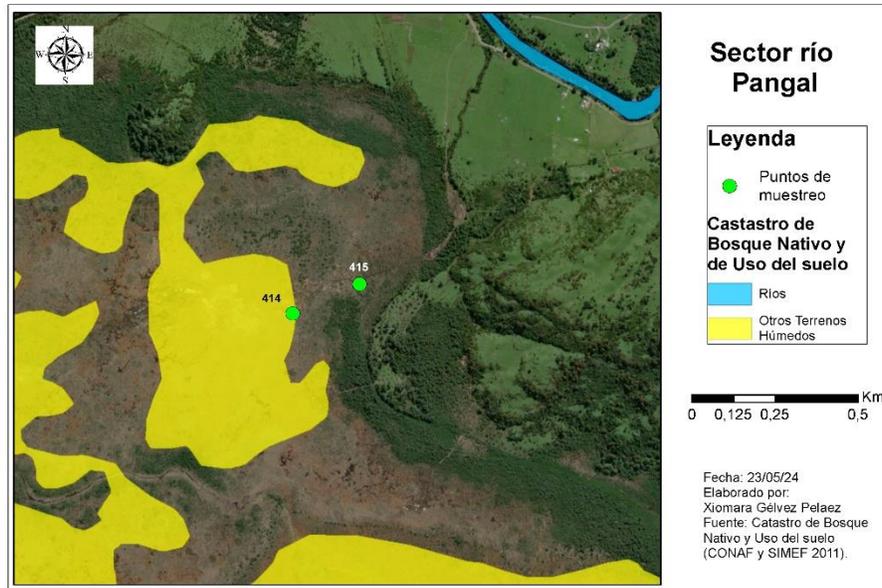
**Figura 3.** Ganado pastando en el margen de la turbera 2 (izquierda). Colecta manual de *Sphagnum* en turbera 4 (derecha). (Foto: G. Gaudig).

- *Clasificación de la Turbera 2*

La turba de raíces (*radicell*) y los componentes de los sedimentos de aguas abiertas (*gyttja*) indican condiciones húmedas probablemente durante la terrenalización o paludificación de una antigua rama del río. Debido a que las parcelas de investigación están situadas a un máximo de 70 m del margen y faltan datos sobre el subsuelo mineral o los núcleos en el centro de las turberas, es difícil determinar el desarrollo de estas. Pero la ocurrencia relativamente reciente de *Sphagnum magellanicum* (capas poco profundas de biomasa o turba) muestra una disminución del impacto del agua subterránea, mientras que el impacto del agua de lluvia aumenta. Dado que el área de captación parece ser bastante pequeña, se asume poca entrada de agua del área circundante a las turberas. Sin embargo, las partes de turberas hacia el río albergan menos plantas vasculares que las partes más alejadas del río, donde una mayor cobertura de plantas vasculares y montículos de *Sphagnum* indican condiciones temporalmente más secas y mayores fluctuaciones del nivel freático. La eliminación de la cubierta de *Sphagnum* por recolección podría perjudicar las condiciones hidrológicas, al menos para la situación en el margen, y también para el rebrote de *Sphagnum*.

- *Turbera 4 en la Comuna de Aysén*

La turbera 4 está situada a unos 4 km al noreste de Puerto Aysén, directamente cerca del río Pangal. La recolección de *Sphagnum* es llevada a cabo por varios recolectores en casi toda la turbera con aproximadamente 350 ha de área abierta cubierta principalmente por *Sphagnum magellanicum*.



**Figura 4.** Parcelas de investigación (números de los puntos GPS) en la turbera 4 al sur del río Pangal, comuna Aysén.

**Cuadro 5.** Caracterización de la turbera 4

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1. Área cercana a la cosecha	414	4.72	43	36
vegetación	<i>Sphagnum magellanicum</i> (100%, muy compacto), <i>Gaultheria mugronata</i> , <i>Empetrum rubrum</i> , <i>Nanodea muscosa</i> , <i>Schoenoplectus caufornicus</i> , <i>Roscovia</i> sp. (cf. <i>magellanicum</i> )			
muestreo	<i>Sphagnum</i> y turba ( capitula 66-71 cm)			
	Profundidad	Tipo de turba	Grado de descomposición (de Von Post 1924)	Observaciones
	0 – 24 cm	<i>Sphagnum césped</i>		
	24 – 45 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H3-4	Carbón, raíces vivas, raicillas <i>Ericaceae</i>
	45 – 61 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H4	<i>Ericaceae</i> , raíces, cenizas volcánicas
	61 – 76 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H3	<i>Ericaceae</i>
núcleo	76 – 83 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H5	<i>Ericaceae</i>
	83 – 124 cm	Turba de raíces	H9	<i>Sphagnum</i> , arena
	124 – 126 cm	arena		
	126 – 141 cm	<i>Sphagnum turba de raíces</i>	H4-6	
	141 – 142 cm	Ceniza volcánica negra		
	142 – 190 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H5-6	
	190 – 220 cm	Turba madera	H9	

220 – 232 cm	Turba de raíces	H8	
232 – 234 cm	Ceniza Volcánica		
234 – 240 cm	Turba madera, raíces	H7	
240 – 250 cm	arena		Raíces, ceniza Volcánica
250 – 275 cm	Turba madera	H9	Raíces, liquido
275 – 300 cm	Turba Amorfa	H9-10	Raíces, arena, madera

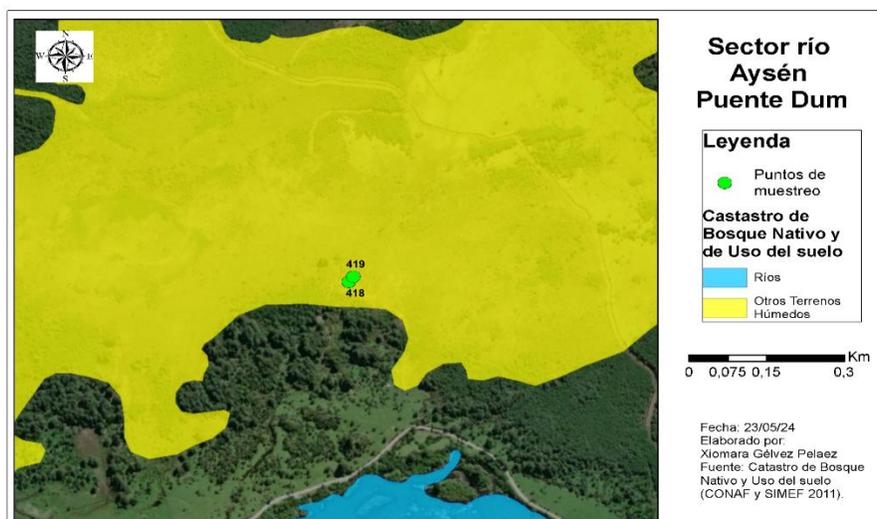
Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
2. aguas abiertas junto al "ferrocarril" con hierro reducido	415	5.96	91	
3.	415	5.9	24	

- *Clasificación de Turbera 4*

El subsuelo mineral no se alcanzó a muestrear, pero se encontraron depósitos de turba hasta 3 m de profundidad. La turba fue acumulada principalmente por *Sphagnum*, raicillas o madera que está altamente descompuesta por debajo de los 80 cm de profundidad. Las capas de turba superiores consisten principalmente en turba *Sphagnum* ligeramente descompuesta. Esta estratigrafía es típica de una turbera elevada, que también está indicado por su posición en el paisaje. La eliminación del acrotelm (capa superior autorregulada) destruye la funcionalidad de este sistema de turberas. Su regeneración lleva mucho tiempo o fracasará.

- *Turbera 5 en la Comuna de Aysén*

La turbera 5 está situada a 4 km al este de Puerto Aysén, directamente cerca del Río Aysén. Está cubierto en gran parte con árboles y otras plantas vasculares y con algunos parches de *Sphagnum* que crecen en montículos. No hay cosecha de *Sphagnum* en esta turbera.



**Figura 5.** Parcelas de investigación (números de puntos GPS) turbera 5 al norte del río Aysén, comuna de Aysén.

**Cuadro 6.** Caracterización de la turbera 5

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1. Margen	418	5.41	18	
2. Cercano al centro	419	5.22	28	10
Vegetación	<i>Juncus lessuaudi</i> , <i>Blechnum pendamarina</i> , <i>Carex banksii</i> , <i>Myrtida numularia</i> , ( <i>Blechnum cordatum</i> )			
	Profundidad	Tipo de turba	Grado de descomposición (de Von Post 1924)	Observaciones
	0 – 12 cm	Césped <i>Sphagnum</i>		
	12 – 21 cm	Turba de Raíces <i>Sphagnum</i>	H3	Carbón, raíces vivas, raicillas (radicell), <i>Ericaceae</i>
	21 – 38 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H4	
	38 – 60 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H7-9	Carbón grueso y arena
	60 – 63 cm	limo		raicillas
	63 – 69 cm	Turba madera	H9	Raíces, raicillas hojas de <i>Nothofagus dombeyi</i> , cieno
núcleo	69 – 72 cm	cieno		
	72 – 100 cm	Turba madera	H9	Raíces (radicell) <i>Nothofagus</i> hoja, <i>Berberis microphylla</i> ('Calafate') hoja, limoso
	100 – 150 cm	gyttja	K3	Radiceles, madera, <i>Berberis microphylla</i> ('Calafate') hoja
	150 – 170 cm	Pérdida de núcleo		
	170 – 200 cm	Turba de raíces	H7	madera, <i>Berberis microphylla</i> ('Calafate') hoja, arena, lodo

- *Clasificación de la Turbera 5*

El subsuelo mineral no se alcanzó mediante extracción de muestras, sino que se encontraron depósitos de turba hasta 2 m de profundidad. La turba por debajo de los 40 cm de profundidad fue acumulada principalmente por madera o raíces y está altamente descompuesta. Hay lodo entre 100 y 150 cm de profundidad que indica aguas abiertas en esta parcela durante un largo tiempo, antes de que se establezca turba de madera acumulada, lo que indica una turbera de paludificación / terrestreización.

En los 40 cm superiores aumenta la proporción de *Sphagnum*, lo que apunta a un impacto creciente del agua de lluvia. Las condiciones del sitio son subneutras y pobres en nutrientes, pero con las más altas concentraciones de hierro en el agua de poro muestran todavía un impacto de las aguas subterráneas. Los montículos y las áreas de aguas abiertas muestran las fluctuaciones de la capa freática. Para poder evaluar

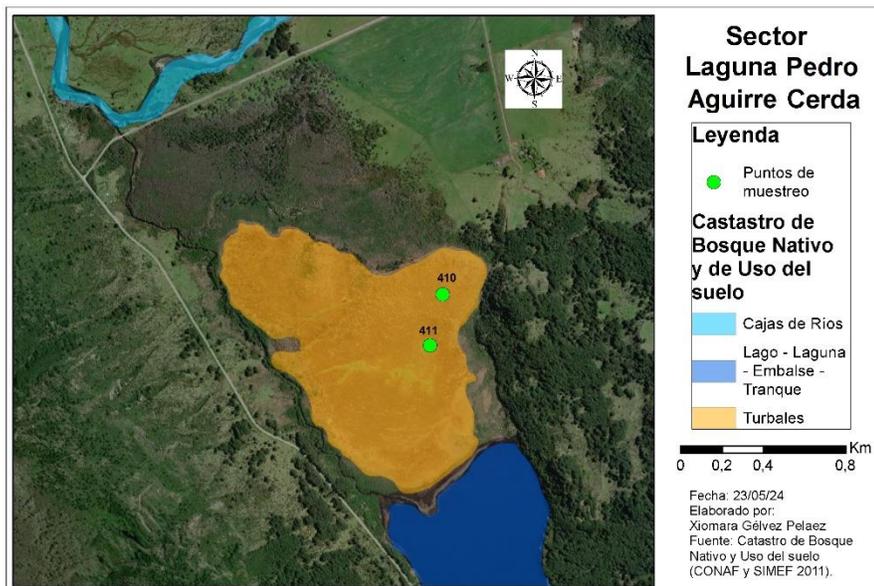
de manera concluyente el potencial de recolección de *Sphagnum* o paludicultura de *Sphagnum*, se necesitan investigaciones más intensivas sobre hidrología y condiciones de nutrientes.

### Turbera en Laguna Pedro Aguirre Cerda Comuna de Coyhaique

La turbera Pedro Aguirre Cerda está situada en el norte de la comuna de Coyhaique, a unos 62 km al noreste de Aysén. Tiene aproximadamente 110 ha de tamaño, la superficie está ligeramente inclinada (0,3%) y modelada en montículos y honduras. La turbera está bordeada por el río Mañihuales alrededor de 750 m en el norte y drena hacia el lago Aguirre Cerda en el sur. A 150 m de distancia (mínimo) la Carretera Austral pasa por el lado occidental de la turbera. Un pequeño arroyo entre la carretera y las turberas conecta el río con el lago. El clima regional se clasifica como templado oceánico frío, con una temperatura media anual de ~6°C y una precipitación media anual de ~2.500 mm (DGA, 2004). Hay una menor pérdida de agua por evapotranspiración y escorrentía lateral o vertical que el suministro de agua, principalmente por precipitación, conduce a un excedente de agua en las turberas y la formación de apozamiento (Domínguez & Martínez 2021). La filtración en las profundidades se ralentiza por el aumento del grado de descomposición de la turba.

La turbera Pedro Aguirre Cerda está bien investigada, también con análisis paleoecológico. La acumulación de materia orgánica comenzó alrededor de 9.800 AP, probablemente en un momento posterior al final de la gran salida de agua de deshielo glacial a través del valle del río Mañihuales durante el final de la última edad de hielo (Reid & McCulloch 2021). Una capa de turberas de hasta 5,5 m se ha acumulado en alta proporción (ibíd.). En el resultado del nuestro realizado se encontró de 1 a 1,35 m turba de *Sphagnum* descompuesta por encima de *Sphagnum* descompuesto más alto o turba de raíces, que fue interrumpida por capas delgadas de arena o ceniza volcánica. No se llegó al subsuelo mineral. Este tipo es una turbera elevada.

La recolección de *Sphagnum* solo ocurre en pequeñas cantidades en el borde norte de la turbera desde 2012. En esta turbera también se han llevado a cabo experimentos de rebrote por parte de Domínguez y Martínez (2021). Se observaron huellas dejadas por las máquinas demarcando profundamente la turbera cerca de la parcela de investigación 411.



**Figura 6.** Parcelas de investigación (números de los puntos GPS) en la turbera 3 adyacente a la Carretera Austral y Laguna Pedro Aguirre Cerda, comuna Coyhaique.

**Cuadro 7.** Caracterización de la meseta de turberas 3

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
1. Meseta en el centro	410	4.5	83	35
Vegetación	<i>Sphagnum magellanicum</i> (100%, muy compacto), <i>Tetrontium punteum</i> , <i>Gaultheria antarctica</i> , <i>Empetrum rubrum</i> , <i>Nanoda nusca</i> , y en los bordes de la turbera también con <i>Sphagnum falcatulum</i>			
Muestreo	<i>Sphagnum</i> y turba (Capitula, 35-40 cm, 106-111 cm)			
Núcleo	Profundidad	Tipo de turba	Grado de descomposición (de Von Post 1924)	Observaciones
	0 – 15 cm	<i>Sphagnum césped</i>		
	15 – 31 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H1	
	31 – 86 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H2	
	86 – 115 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H3	Raíces
	115 – 125 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H4	Carbón
	125 – 135 cm	<i>Sphagnum</i> Cymb., turba de raíces	H5	<i>Ericaceae</i> , <i>gyttja</i>
	135 – 145 cm	<i>Sphagnum</i> Cymb. Turba de raíces	H6	<i>Ericaceae</i>
	145 – 156 cm	arena ( fina y mediana)		
	156 – 188 cm	<i>Sphagnum</i> Cymb. Turba de raíces	H6	<i>Ericaceae</i>
	188 – 192 cm	arena		
	192 – 193 cm	Ceniza volcánica negra		
	193 – 222 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H6-7	
	222 – 227 cm	arena		
	227 – 230 cm	Ceniza volcánica negra		
	230 – 234 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H4	
	234 – 258 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H6-7	Raíces, arena, ceniza volcánica
	258 – 260 cm	arena		
	260 – 269 cm	Turba de raíces	H7	madera <i>Sphagnum</i>
	269 – 273 cm	Turba de raíces	H7	<i>Sphagnum</i> , limo
273 – 300 cm	Turba de raíces	H7		



**Figura 7.** Meseta de la turbera 3 (izquierda). Muestreando en el centro de la turbera 3 (derecha). (Fotos: G. Gaudig).

**Cuadro 8.** Caracterización del centro de la turbera 3

Ubicación	GPS	pH superficie del agua	eC de la superficie del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ )	Nivel freático por debajo de la superficie de <i>Sphagnum</i> (cm)
2. Centro (hacia la laguna)	411	4.3	20	10
Vegetación	<i>Sphagnum cuspidatum</i>			
Observaciones	Fecas de ave			
Núcleo	Profundidad	Tipo de turba	Grado de descomposición (de Von Post 1924)	Observaciones
	0 – 90 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H2	Raíces muy sueltas
	90 – 100 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H3-4	<i>Ericaceae</i> , Raíces
	100 – 115 cm	Pérdida del núcleo		
	115 – 131 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H7	madera
	131 – 134 cm	Arena		
	134 – 145 cm	<i>Sphagnum</i> turba de raíces	H6-7	
	145 – 150 cm	Turba de raíces	H7	Arena, limo
	150 – 165 cm	Lodo		
	165 – 180 cm	Turba de raíces	H8	lodo, madera
	180 – 187 cm	arena + ceniza volcánica		
	187 – 193 cm	<i>Sphagnum</i> turba	H3	Arena, ceniza volcánica
> 193 cm	Turba de raíces	H7	Madera, arena, <i>Sphagnum</i>	

- *Clasificación de la Turbera 3*

Dado que la turbera Pedro Aguirre Cerda es una turbera de acrotelm, con el acrotelm como capa funcional para el mantenimiento de la turbera (Domínguez & Martínez 2021). La eliminación de la capa de *Sphagnum* sería desastrosa para esta, no solo en la parte superior (meseta) que actúa como depósito de agua, sino

también en el margen, lo que afectaría sustancialmente la hidrología en toda el área de turberas. Además, el pisoteo de caminos (con recolección regular) o la conducción de máquinas o accesos, conducirían a la compactación de las capas superiores de turba, en las que las plantas vasculares y los árboles pueden establecerse con mayores tasas de evapotranspiración como resultado y también crear drenajes artificiales que afectan la hidrología de las turberas.

### Comparación de las Condiciones del Sitio de Turberas Visitadas

- *Condiciones Climáticas*

El clima en la región visitada más al norte cerca de Puerto Aysén se clasifica como templado fresco oceánico, con una temperatura media anual de 6 a 9.5 ° C y una precipitación media anual de 2,240-2,500 mm. La zona del Lago Vargas entre Cochrane y Tortel a 250 km al sur de Puerto Aysén muestra temperaturas medias anuales de 11°C y precipitación media anual de 1.300 mm, más seca y cálida.

- *Tipo de Turbera*

Las turberas visitadas son principalmente turberas elevadas con un acrotelmo (capa superior autorregulada) y depósitos profundos de turba (turberas 1, 3, 4). Las turberas 2 y 5 parecen ser turberas de terrestreización (o paludificación) con un impacto recientemente creciente del agua de lluvia, por lo que es probable un desarrollo hacia una turbera elevada.

- *Nutrientes*

Los contenidos de nitrógeno, potasio y fósforo en la turba de todas las turberas visitadas son bajos, como se describe para las turberas con valores particulares muy bajos de nitrógeno. Los contenidos de nitrógeno son similares a los valores más bajos descritos para la turba *Sphagnum magellanicum* en turberas de las cuencas de los ríos Pascua y Baker en Aysén y en la Isla Grande de Chiloé. (León & Oliván, 2014; León *et al.*, 2021), indicando condiciones oligotróficas muy pobres (C/N=50 para turba de *S. magellanicum* en la región Aysén (Rodríguez Martínez, 2015).

En el capítulo de *Sphagnum* se registraron valores más bajos de N y mayores de P y K en comparación con una turbera en la Patagonia Austral > 800 km al sur de los sitios en Aysén (Fritz *et al.*, 2012). En comparación con las turberas naturales de las tierras bajas de Kolkheti (ubicado en el Cáucaso en Georgia), también caracterizadas por una alta precipitación anual > 2.000 mm y situadas junto al mar, con vegetación de *Sphagnum papillosum* y *S. palustre* se encontraron valores predominantemente de P más altos y contenidos similares de K en las turberas de Aysén que en Kolkheti con < 0,61 mg P g/DM y 2,6 – 4,9 mg K g/DM (Krebs *et al.*, 2016).

Las mediciones en el agua de poro muestran condiciones ácidas con baja conductividad eléctrica, lo que también describen Rodríguez Martínez (2015) o Reid & Torres (2021) para otras turberas de la región Aysén. El agua de poro también tiene bajas concentraciones de elementos, en particular para amonio, nitrato y fósforo, con la excepción de valores de Ca más altos en las turberas 1, sitio 3 y turberas 3 en la meseta en el centro de turberas (Bragazza & Gerdol, 2002; Käärmelahti *et al.*, 2023).

A pesar de la baja disponibilidad general de nutrientes en los cocientes N/P y N/K del agua de turba y poro en los capítulos de *Sphagnum* de 7-19 y 1.1-2.3, respectivamente, lo que indica un suministro de nutrientes generalmente bueno para el crecimiento de *Sphagnum* con algunos signos de limitaciones de nitrógeno. El rocío marino y rara vez las inundaciones de los ríos pueden tener un papel importante en la influencia del estado nutricional de los musgos *Sphagnum*.

### Recomendaciones para Futuras Cosechas de *Sphagnum* en Aysén, Chile

Las turberas en Aysén permanecieron intactas por más tiempo que en otras regiones de Chile. La biomasa de *Sphagnum* se recolecta en Chile desde la década de 1990, lo cual está regulado por el Decreto Supremo

N° 25 desde 2019. Las normas son en gran medida buenas, pero para su eficacia es importante aplicar controles y sanciones. Pero la regla de dejar 5 cm de musgo *Sphagnum* no está clara y es difícil de seguir y controlar. Se recomienda concretar la profundidad de recolección vista desde la superficie del musgo.

Además, se recomienda especificar las normas para los tipos de turberas, ya que los impactos de la recolección de *Sphagnum* dependen de la hidrología, otras condiciones del sitio, el relieve y la infraestructura antropogénica (carreteras, zanjas, etc.) de las turberas y sus alrededores. En las turberas elevadas, el acrotelma construido principalmente a partir de *Sphagnum* como capa superior autorregulada es crucial para la hidrología y para la existencia y el mantenimiento del sistema de acumulación en la turba. Su eliminación conduce a condiciones más secas y probablemente degradantes de turba que son desfavorables para el rebrote de *Sphagnum*. La recolección sostenible de *Sphagnum* es en gran medida imposible en las turberas con acrotelm. Por lo tanto, se sugiere incluir en la revisión del Decreto Supremo N° 25 también la obligación de determinar el tipo de turbera para el otorgamiento del permiso para la recolección de *Sphagnum*.

En contraste, la hidrología en pomponales es diferente. Como resultado de la tala de cipreses, el suministro de agua y el nivel freático son constantemente altos sin una capa superior autorregulada en estos tipos secundarios de turberas, pero con capacidades crecientes de almacenamiento de agua (y probablemente filtración de agua). En tales condiciones, *Sphagnum* puede volver a crecer en unos pocos años, si se cosecha poco profundo (máx. 15 cm) y se evita la inundación de la capa residual. La cosecha en tiras angostas o la aplicación adicional de fragmentos frescos de *Sphagnum* después de la recolección podría acelerar el rebrote. Aunque el Decreto Supremo N° 25 prescribe que al menos el 30% de los musgos deben dejarse intactos, no existen regulaciones sobre su distribución. Para el rebrote de *Sphagnum*, los restos distribuidos ("en parches") serían mejores en lugar de "bloques compactos" de musgos intactos. Sin embargo, se debe evitar la inundación de la capa residual de *Sphagnum* para evitar condiciones anóxicas y el posible establecimiento de algas como competidoras de la luz y los nutrientes que perjudican y, en última instancia, previenen el rebrote de *Sphagnum*.

El Decreto Supremo N° 25 debe revisarse y actualizarse cada dos años teniendo en cuenta los resultados recientes de las investigaciones, las experiencias y el consenso de un grupo de expertos.

Las turberas intactas contribuyen significativamente a la biodiversidad regional y proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, como el sumidero de carbono y el almacenamiento y purificación de agua, el enfriamiento del paisaje, etc. Su capacidad para secuestrar carbono en la turba o para almacenar y filtrar agua hace que los ecosistemas sean muy valiosos con respecto a la mitigación y adaptación al cambio climático. Por esta razón, se recomienda mantener la funcionalidad de las turberas intactas y valorar su rendimiento como sumideros de carbono y almacenadoras de agua. Para ello el mantenimiento de su hidrología es crucial. Para alcanzar la neutralidad de CO<sub>2</sub> para 2050, como se comprometió en el Acuerdo de París, también se debe prestar atención al impacto climático de las turberas, porque cuando estas se drenan, emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

### **Paludicultura de *Sphagnum* en Turberas Preutilizadas**

La paludicultura de *Sphagnum* es el cultivo de musgos de turba en turberas degradadas y rehumedecidas. En Alemania se tienen experiencias con la paludicultura de *Sphagnum* en turberas cortadas o turberas anteriormente utilizadas como pastizales (Gaudig *et al.*, 2018). Para su instalación, los fragmentos de *Sphagnum* se extienden sobre la superficie de turba preparada (nivelada, libre de vegetación) de un pantano degradado, antes de volver a humedecer. El nivel freático se mantiene cerca de la superficie mediante un sistema de riego automático a través de zanjas y bombas. El nivel freático se incrementa con el crecimiento de *Sphagnum*. Debe haber un sistema de gestión adecuado del agua, entrada para el riego y también un flujo de salida para evitar la inundación del *Sphagnum*, en Alemania, en particular durante el invierno, es esencial para la paludicultura de *Sphagnum*. En Chile, la paludicultura de *Sphagnum* podría ser una opción para las turberas degradadas y preutilizadas para lograr una mejora significativa en su hidrología y, por lo tanto, en la conservación de la turbera.

Las condiciones adecuadas para la paludicultura de *Sphagnum* son:

- Balance hídrico positivo, preferiblemente durante todo el año
- Precipitación distribuida uniformemente (alta), en particular en épocas de altas temperaturas durante los largos períodos del año con temperaturas  $> 0^{\circ}\text{C}$  (ya que *Sphagnum* crece a temperaturas  $> 0^{\circ}\text{C}$ )
- Disponer superficie plana con o sin micro relieve para facilitar la gestión del agua: mantener un suministro constante de agua de los musgos *Sphagnum*, evitando inundaciones
- El área inmersa en un entorno húmedo causa menos pérdida de agua
- El subsuelo superficial debe ser turba, cuanto más profunda sea la capa de turba, mejor.
- El subsuelo superficial (turba) con bajo grado de descomposición, pero con alta conductividad del agua permite una buena gestión del agua
- Un suelo impermeable al agua o poco permeable debajo del subsuelo superficial extendido, permite reducir las pérdidas de agua
- Si la precipitación no es suficiente para el suministro constante de agua, es necesaria la disponibilidad de agua de riego.
- Calidad del agua de poro y agua de riego potencial: con valores bajos de pH (~3-6.5), baja conductividad eléctrica ( $< 500\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ), bajas concentraciones de bicarbonato y calcio ( $< 500\ \mu\text{mol}/\text{l}$ )
- Preferiblemente condiciones de sitio pobres en nutrientes, en particular baja deposición de nitrógeno ( $< 15\ \text{kg N}/\text{ha}/\text{año}$ )
- Acceso a la zona para la gestión (disponibilidad eléctrica para bombas, etc.), cosecha y transporte de la biomasa *Sphagnum* cosechada
- Disponibilidad del material de operación para *Sphagnum*: elementos de trabajo, aparatos de lo más cerca posible para la instalación del sitio.

Para evaluar la idoneidad de un sitio para la paludicultura de *Sphagnum*, se debe disponer de los siguientes datos:

#### Clima

- Suma anual de precipitación
- Distribución anual de la precipitación
- Temperatura promedio diaria
- Humedad media diaria
- Radiación solar

#### Topografía

- Altitud con respecto al nivel del mar
- Relieve (llanura, pendiente)
- Micro relieve
- Integración en el paisaje – considerando los alrededores (valle, montañas, otras turberas)

#### Subsuelo

- Tipo de subsuelo(s), en particular el subsuelo superficial
- Espesor de las capas del subsuelo
- Grado de descomposición (turba)
- Características químicas de los subsuelos (por ejemplo, pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, hidrógeno carbonato)
- Características físicas de los subsuelos (conductividad del agua, porosidad, densidad aparente seca)

#### Agua

- Características químicas del agua porosa y del agua de riego potencial (por ejemplo, pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, hidrógeno carbonato)
- Disponibilidad de agua para mantener condiciones húmedas constantes (alta humedad, alto nivel freático) para *Sphagnum*

- Opciones potenciales para la gestión del agua (regulación de la capa freática – aumento y disminución)

Historia cultural, usos recientes

- Uso anterior del sitio y alrededores (qué actividades humanas)
- Uso reciente del sitio y sus alrededores

## REFERENCIAS

- Bragazza, L. & Gerdol, R. (2002).** Are nutrient availability and acidity-alkalinity gradients related in *Sphagnum*-dominated peatlands? *Journal of Vegetation Science*, 13(4): 473-482. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02074.x>
- DGA (2004).** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Aysén. Preparado por Cade-Idepe consultores. Dirección General de Aguas. En: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aysén.pdf>
- Dirección Meteorológica de Chile (2016).** En: [https://en.wikipedia.org/wiki/Puerto\\_Ays%C3%A9n](https://en.wikipedia.org/wiki/Puerto_Ays%C3%A9n)
- Domínguez, E. & Martínez, M.P. (2021).** Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Colección libros INIA No. 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 p.
- Domínguez Díaz, E.; Martínez de Urquidi, M. P. & Montti Solis, A. (2022).** Restauración de la cubierta vegetal en una turbera de musgo *Sphagnum* en Aysén: Una primera aproximación. Boletín INIA N° 467. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike. Coyhaique, Chile. 64 p.
- Fritz, C.; Van Dijk, G., Smolders, A. J. P.; Pancotto, V. A.; Elzenga, T. J. T. M. et al. (2012).** Nutrient additions in pristine Patagonian *Sphagnum* bog vegetation: Can phosphorus addition alleviate (the effects of) increased nitrogen loads? *Plant Biology*, 14(3): 491-499. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00527.x>
- Gaudig, G.; Krebs, M.; Prager, A., Wichmann, S. et al. (2018).** *Sphagnum* farming from species selection to the production of growing media: a review. *Mires & Peat*, 20(13): 1-30. En: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map20/map2013.php> 10.19189/MaP.2018.OMB.340
- Holz, A.; Haberle, S.; Veblen, T. T.; De Pol-Holz, R. & Southon, J. (2012).** Fire history in western Patagonia from paired tree-ring fire-scar and charcoal records. *Climate of the Past*, 8(2): 451-466. <https://doi.org/10.5194/cp-8-451-2012>
- Käärmelahti, S. A.; Temmink, R. J. M.; van Dijk, G.; Prager, A., Kohl, M. et al. (2023).** Nutrient dynamics of 12 *Sphagnum* species during establishment on a rewetted bog. *Plant Biology*, 25(5): 715-726. <https://doi.org/10.1111/plb.13534>
- Krebs, M.; Gaudig, G. & Joosten, H. (2016).** Record growth of *Sphagnum papillosum* in Georgia (Transcaucasus): rain frequency, temperature and microhabitat as key drivers in natural bogs. *Mires & Peat*, 18(4): 1-16. 10.19189/MaP.2015.OMB.190
- León, C. A. & Oliván, G. (2014).** Recent rates of carbon and nitrogen accumulation in peatlands of Isla Grande de Chiloé-Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, N°87. Pp: 1-7. <https://doi.org/10.1186/s40693-014-0026-y>
- León, C. A.; Gabriel, M.; Martínez Rodríguez, C.; Iturraspe, R.; Savoretti, A. et al. (2021).** Peatlands of southern South America: a review. *Mires & Peat*, 27(3): 1-29. 10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.2021
- Pfeiffer, M.; Mascayano, C. & Aburto, F. (2010).** Soils of Chilean Patagonia in glacial and periglacial environments. *Eurasian Soil Sc.*, 43(13): 1430–1438. <https://doi.org/10.1134/S106422931013003X>
- Quinty, F., & Rochefort, L. (2003).** Peatland restoration guide (p. 106). Fredericton, NB, Canada: Canadian *Sphagnum* Peat Moss Association.
- Reid, B. y McCulloch, R. (2021).** Hidrología de una turbera de *Sphagnum* en la Patagonia chilena. Cap. 5. Pp: 111

- 131. En: Domínguez, E. & Martínez, M.P. (Eds). Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamei Aike, Chile. Coyhaique. 344 p.
- Reid, B. & Torres, R. (2021).** La conexión entre hidrología y calidad de aguas: Un factor clave en la conservación de las turberas en la región de Aysén. Cap. 4. Pp: 91-109. Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Colección libros INIA, (41).
- Rodríguez Martínez, A. C. (2015).** Hydrogeomorphic classification of mire ecosystems within the Baker and Pascua Basins in the Region Aysén, Chilean Patagonia: a tool for their assessment and monitoring (Doctoral dissertation, Humboldt-Universität).
- UNEP (2022).** Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Vacarezza, F. (2012).** Gestión Ambiental de las turberas de Magallanes (Environmental Management of the Peatlands of Magallanes). Doctoral dissertation, University of Barcelona, Spain, 445 pp. (in Spanish).
- Von Post, L. (1924).** Das genetische System der organogenen Bildungen Schwedens. In: Frosterus, B. (Ed). Mémoires sur la Nomenclature et la Classification des Sols. Comité International de Pédologie, IV ème commission (commission pour la nomenclature et classification des sols, commission pour l'Europe). Helsingfors/Helsinki. Pp: 287–304.

### Anexo 1. Glosario de Términos.

- **Acrotelm:** Capa superior productora de turba de una turbera con alta capacidad de almacenamiento de agua y un marcado gradiente de conductividad hidráulica. Las fluctuaciones del nivel freático y el flujo de agua horizontal se limitan predominantemente a esta capa. El acrotelm estabiliza las condiciones hidráulicas.
- **Biomasa de *Sphagnum*:** Capa superior, viva y vital de *Sphagnum* con alto potencial de regeneración, que fue determinada como los 12 cm superiores de la capa.
- **Fango límnicos:** Una turbera, donde actualmente se está formando y acumulando turba.
- **Gyttja:** Material sedimentario acumulado bajo el agua de origen orgánico y/o mineral, en su mayoría sedimentos.
- **Paludificación:** La formación de condiciones de encharcamiento: también se refiere a la acumulación de turba que comienza directamente sobre un suelo mineral anteriormente seco.
- **Pantano:** Lodazal sólo alimentada por la precipitación
- **Pantano elevado:** Turbera con su superficie y nivel de agua claramente elevados por encima del de la ciénaga geogénica/suelo mineral circundante y que recibe nutrientes únicamente de la atmósfera.
- **Pompón:** Mechón/ matas de *Sphagnum*
- **Pomponales / Pomponeras:** Humedal donde crece *Sphagnum* se desarrolló en tiempos recientes después de incendios y extracciones (en Aysén especialmente de ciprés de las Guaitecas, *Pilgerodendron uviferum*), pero sin capas de turba o con capas poco profundas. No se permite extraer el ciprés de las Guaitecas cuando está vivo, solo si está muerto (especie protegida).
- **Radicélulas:** Raíces y raicillas principalmente de juncos.
- **Terrenalización:** La acumulación de sedimentos y turbas en aguas abiertas.
- **Turbera:** Un área con o sin vegetación con una capa de turba acumulada naturalmente en la superficie.
- **Turba de *Sphagnum*:** Material acumulado sedentario proveniente principalmente de musgos de *Sphagnum* que consiste en al menos un 30% (peso seco) de material orgánico muerto.





---

APUNTE

## Salicáceas como opción bioenergética para la Patagonia Aysenina.

Juan Pinilla Suárez<sup>1</sup>; Xiomara Gélvez Pelaez<sup>2</sup>; Jaime Salinas Sanhueza<sup>2</sup> & Bernardo Acuña Aroca<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Forestal, sede Biobío, Chile. [jpinilla@infor.cl](mailto:jpinilla@infor.cl)

<sup>2</sup> Instituto Forestal, sede Coyhaique, Chile.

\*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.600>

Recibido: 17.12.2023; Aceptado 25.03.2024.

---

### RESUMEN

La utilización eficiente de la biomasa forestal en procesos de generación de energía es una de las líneas de trabajo del Instituto Forestal, caracterizando especies adaptadas a distintas situaciones de crecimiento y de una productividad que permitan su utilización en la generación de energía. Esto es particularmente importante para el área de la Patagonia Aysenina, debido a la dependencia de la leña como fuente de calefacción y a la creciente necesidad de abastecimiento de biomasa para energía. Se realizó una búsqueda de información actualizada acerca de especies de Salicáceas con uso potencial como Biocombustibles en la zona de interés, obteniendo antecedentes de crecimiento y biomasa. Los resultados generales indican que estas especies son interesantes alternativas para generar centros de ofertas de biomasa para su uso en energía, situación que obedece a su adaptación a las zonas analizadas, la experiencia existente y especialmente, por los requerimientos de los habitantes de Coyhaique y Patagonia chilena por satisfacer sus requerimientos de energía a nivel domiciliario en beneficio de su bienestar. La importancia de estas especies se incrementa en el nuevo escenario normativo, el cual define a la leña como un biocombustible, y le exige determinados requisitos para su producción y comercialización. Para contribuir a la oferta de biomasa destinada a la producción de energía, abordando temáticas de silvicultura y mejoramiento genético de las salicáceas abordadas en este artículo, se requiere ampliar su estudio en las zonas de interés.

**Palabras clave:** Salicáceas, Energía, Coyhaique, Leña, Biomasa, Patagonia.

### SUMMARY

The efficient use of forest biomass in energy generation processes is one of the lines of work of the Forestry Institute, characterizing species adapted to different growth situations and productivity that allow their use in energy generation. This is particularly important for the *Patagonia Aysenina* area, due to the dependence on firewood as a heating source and the growing need to supply biomass for energy. A search was carried out for updated information about Salicaceae species that could have potential for use as Biofuels in the area of interest, obtaining growth and biomass history. The general results indicate that these species are interesting alternatives to generate biomass supply centers for use in energy, given their adaptation to the areas analyzed, the existing experience and especially, the requirements of the inhabitants of Coyhaique and Chilean Patagonia. satisfy your energy requirements at home level for the benefit of your well-being. This is even more so when there is a new regulatory scenario that defines Firewood as Biofuels, which requires it to comply with requirements for its production and commercialization. It is necessary to expand these studies in the area of interest to contribute to the supply of biomass for use in energy, addressing forestry issues and appropriate genetic improvement for potential species.

**Keywords:** Salicaceae, Energy, Coyhaique, Firewood, Biomass

---

## INTRODUCCIÓN

Se entiende biomasa como toda materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueda ser convertida en energía. La biomasa, particularmente de origen forestal, ha permitido el desarrollo acelerado de tecnologías de recolección, transformación y combustión, estando ya en un nivel relativamente dominado. En Chile, la biomasa se emplea principalmente para la producción de energía calórica (térmica) y energía eléctrica, ya sea mediante su uso como leña, astillas, pellet y en plantas de cogeneración que se abastecen de los residuos de los procesos industriales (licor negro, corteza, otros), generando la energía que demanda el funcionamiento de su industria y vendiendo los excedentes al SIC (Sistema Interconectado Central) de la red de distribución eléctrica nacional.

Uno de los componentes de la investigación tecnológica forestal que busca alternativas energéticas para las distintas zonas en Chile, corresponde a la identificación de especies forestales que pueden ser utilizadas en generación de biomasa para energía, incluyendo en ello a las plantaciones bioenergéticas. Estas plantaciones se han considerado las más eficientes para el abastecimiento de plantas generadoras de energía a partir de biomasa y son ampliamente usadas en España, Estados Unidos, Inglaterra, Suecia, Nueva Zelanda, Alemania y Brasil, entre otros, para la generación de energía térmica y eléctrica. Su característica principal es que se establecen con especies forestales de rápido crecimiento y corta rotación.

Según el Observatorio de Biocombustibles de INFOR, el año 2019 se estimó para la Región de Aysén un consumo cercano a los 441.711 m<sup>3</sup>, distribuidas aproximadamente entre 30.800 viviendas urbanas (99% del total de viviendas) y 9.67 viviendas rurales (100%)<sup>1</sup>.

Reyes *et al.* (2021) señalan que el 80% del consumo total de energía en la región proviene de la leña, con un aumento en su consumo, llegado a los 456 m<sup>3</sup> sólidos/año (64% urbano y 36% rural). En áreas urbanas, el 82% de las viviendas consumen leña a un promedio de 14 m<sup>3</sup> sólidos/vivienda/año, y en áreas rurales el 99% de las viviendas consumen leña a un promedio de 21 m<sup>3</sup> sólidos/vivienda/año.

Los mismos autores mencionan que la comuna de Coyhaique concentra el 44% del consumo regional de leña, y destacan la incorporación del pellet y el efecto del Plan de Descontaminación Atmosférica implementado en Coyhaique, como factores que han motivado una reducción del consumo de leña.

En cuanto a las especies utilizadas como leña en el sector residencial urbano, esta proviene principalmente de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.)). Las especies utilizadas para este fin y el volumen de participación de cada una de ellas se resume en la **Cuadro 1**. El consumo anual de leña por comuna y diferenciado por especies se detalla en la **Cuadro 2**.

**Cuadro 1.** Consumo de leña y composición según especie forestal.

Especie	Volumen (m3 sólidos/año)
Lenga	239.536
Ñirre	38.224
Coigüe	15.896
Tepa	9.394
Tepú	1.002
Otras nativas	93.711
Pino	4.512
Otras exóticas	2.204
No sabe	22.578

(Fuente: Reyes *et al.*, 2021)

<sup>1</sup>

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoieN2JmNTVmZTA0NjRhYy00NmE4LWI1NzktYmFIYWExMTAxODUwliwidCI6IjcwZTI3NDhjLTAzN2MtNDIiZi05N2RkLTl0ODAxYTc2ZmFIYSIsImMiOiJ9&pageName=ReportSection>

**Cuadro 2.** Consumo de leña por comuna y composición según especie forestal (m<sup>3</sup> sólidos/año).

Especies	(m <sup>3</sup> sólidos/año)					
	Coyhaique	Aysén	Cisnes	Guaitecas	Cochrane	Chile Chico
Lenga	117.304	93.100	2.780		12.337	14.105
Nirre	20.890	2.051	4.726		6.169	4.408
Coigüe		12.116	1.946		1.393	441
Tepa			9.174			220
Tepú				1.002		
Otras nativas		11.917	7.784	73.349		661
Pino	1.607	2.627	278			
Otras exóticas						2.204
No sabe	20.890	576	1.112			

(Fuente: Reyes *et al.*, 2021)

Como destacan diversos autores, casi el 100% de la leña que se consume en la región proviene de bosques nativos, no obstante, existe un potencial para la utilización de otras especies que han presentado una adecuada adaptación a las condiciones de la zona, destacando entre ellas a *Pinus ponderosa*, *Pinus contorta* y algunas especies de álamos y sauces.

El uso de la leña en la región de Aysén presenta diversos aspectos a analizar, incluyendo el adecuado manejo del bosque nativo para el suministro de biomasa en su formato de leña y su valor en el comercio, además del autoconsumo.

La leña presenta el menor valor respecto de otras opciones de calefacción, reconociéndose que, para el confort de los habitantes de las regiones australes, como Aysén, es una fuente de energía accesible y declarada como Biocombustible en la reciente Ley 21.499 de Biocombustibles Sólidos del Ministerio de Energía. En el caso específico de este Biocombustible, el nuevo escenario normativo fomentará y exigirá la producción y comercialización sólo de leña seca, la que deberá, entre otros requisitos, presentar un valor de su contenido de humedad inferior al 25%.

Atendiendo al interés y potencialidad que representan los álamos para la Región de Aysén y la Patagonia Chilena y Argentina, especialmente para su uso en calefacción domiciliaria y otros procesos energéticos, y atendiendo también a la diversidad de características de estos territorios, se realizó una recopilación de antecedentes de Salicáceas como opciones bioenergéticas para la región de Aysén.

## ANTECEDENTES GENERALES

Los álamos juegan un rol importante en la mejora y conservación del ambiente, especialmente en la protección de cuencas y cultivos, en la remediación de aguas y suelos contaminados, y en el balance de dióxido de carbono (Wang *et al.*, 1999; Schultz *et al.*, 2000; Isebrands & Karnosky, 2001; Pilipovic *et al.*, 2006). Estos árboles se pueden encontrar en bosques nativos del hemisferio norte, así como en plantaciones en latitudes templadas de ambos hemisferios, en cortinas o pequeños grupos de árboles o en sistemas silvopastorales (Dickmann, 2006; Pincemin *et al.*, 2007). Su madera es utilizada en la industria del aserrío, debobinado, celulosa, tableros de fibras y partículas y biomasa con fines energéticos (Zsuffa *et al.*, 1996; Dickmann, 2001; Dillen *et al.*, 2010). También se ha destacado el beneficio económico del cultivo agrícola entre hileras de álamos, determinando tipos y secuencias de estos que incrementan la rentabilidad de la especie mediante la utilización plena del sitio durante los primeros años de plantación.

Según Cornejo (2016) en suelos adecuados los álamos presentan un gran potencial para el mercado energético. La superficie de plantaciones comerciales de álamos en Chile ha disminuido, pero a la vez existe un mayor conocimiento técnico de las variedades y cultivares de estas especies, como también de

modelos silvícolas para diferentes objetivos de producción industrial y para calefacción como energía limpia (Serra *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2008).

Los álamos tienen gran facilidad para propagarse vegetativamente (clonación), lo que mediante una adecuada selección permite obtener individuos con mejor adaptación al medio, mayor resistencia a las enfermedades o insectos y mayores rendimientos en volumen (FAO, 1980). Se menciona que la introducción de híbridos y cultivares de la especie involucra ventajas económicas que mejoran la rentabilidad del negocio forestal como consecuencia del rápido crecimiento y la corta rotación, y se incorporan ventajas sociales al brindar nuevas alternativas a los pequeños y medianos propietarios.

Luquez *et al.* (2022) destacan la importancia de álamos y sauces para la producción de energía, indicando que tienen una alta productividad de biomasa leñosa sólida en sistemas de alta densidad y corta rotación (2 a 12 años). Estas son especies de crecimiento rápido, que se pueden propagar vegetativamente a partir de estacas leñosas, toleran elevadas densidades de plantación, tienen la capacidad de rebrotar luego del corte y, además, hacen parte de los cultivos bioenergéticos más prometedores para las zonas de clima templado (Keoleian & Volk, 2005).

Existen dos modelos principales de producción de biomasa para generación de energía: Silvicultura de Rotación Media (MRF *Medium Rotation Forestry*) y Silvicultura de Rotación Corta (SRC *Short Rotation Coppice*). Los sistemas MRF consisten en densidades de plantación de 400-2.200 plantas por hectárea y rotaciones entre 6 y 12 años, de acuerdo a las condiciones ambientales del sitio de plantación y al genotipo utilizado. Estos sistemas tienen menor producción que los SRC, sin embargo, proporcionan la opción de obtener, además, productos como pulpa o madera (Baettig *et al.*, 2010; Buchman *et al.*, 2020; Niemczyk, 2021).

El sistema SRC tiene una densidad de plantación entre 5.000 y 20.000 plantas por hectárea, un tiempo de rotación de 2 y 4 años y puede permanecer productivo por al menos 20 años, siendo utilizadas las mayores densidades para los sauces que para los álamos (Keoleian & Volk, 2005, Baettig *et al.* 2010). Los sistemas SRC deben contemplar un corte en el primer año que elimine la tendencia de un tallo dominante, con la finalidad de estimular la brotación de las yemas laterales y la producción de múltiples tallos por planta (Karp & Shield, 2008). Una recomendación para los sistemas de altas densidades de plantación es utilizar al menos 5 genotipos diferentes, evitando plantaciones monoclonales para reducir el riesgo de infecciones por hongos patógenos y otras adversidades bióticas (Luquez *et al.*, 2022).

Para la implementación de alguno de estos sistemas, se debe tener en cuenta que existe una gran diversidad de genotipos, los cuales deben ser seleccionados de acuerdo a las condiciones ambientales de los sitios de plantación, para que la producción de biomasa y el contenido de humedad sean los más adecuados para la producción de energía. Por ejemplo, una desventaja de las Salicáceas es su alta demanda hídrica (Rodríguez & Luquez, 2016), sin embargo, esta demanda varía ampliamente entre las distintas especies.

Wullschleger *et al.* (1998), menciona que el uso de agua de especies de sauces varió entre 106 y 140 Kg/día, mientras que para *Populus trichocarpa* x *P. deltoides* fue de 51 y para *Populus x euroamericana* 109 Kg/día, señalando que en esta familia se presentan grandes diferencias y que sus especies no son las especies forestales con mayor demanda hídrica.

La selección de genotipos debe contemplar aquellas especies de álamos y sauces más tolerantes a las condiciones presentes en cada sitio donde se desean establecer, ya sea condiciones de sequía y o tolerantes al anegamiento de suelos, así como la exposición a climas templados. También se debe tener en cuenta las características deseadas: crecimiento rápido, rebrote vigoroso, tallos erectos, tolerancia a enfermedades y pestes, menor contenido de humedad a cosecha, menor cantidad de cenizas como resultado de la combustión, tolerancia a estreses abióticos, etc. Por lo cual, es necesario identificar los requerimientos y características de especies e identificar los sitios más adecuados para implementar un sistema MRF o SRC.

Luquez *et al.* (2022) indican que *Populus trichocarpa* fue el primer árbol cuyo genoma fue secuenciado, y actualmente están disponibles los genomas de 29 especies e híbridos de *Populus* y 3 especies de *Salix* (*Salix purpurea*, *S. suchowensis* y *S. viminalis*) (Almeida *et al.*, 2020).

Algunas de las mediciones realizadas en estudios en Argentina, encontraron rendimientos de 28 toneladas secas/ha año con *Populus x canadensis* en Mendoza y 45 toneladas secas/ha año con *S. matsudana x S. alba* en el sector “Los Arroyos” en Neuquén, en rotaciones de 2 años.

Las micorrizas son asociaciones simbióticas que se establecen entre diferentes hongos del suelo y las raíces de las plantas. Los hongos les otorgan a las plantas mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes, protección contra patógenos, aumento de la resistencia a factores de estrés abiótico y biótico, y mejor capacidad de competir con otras plantas (Smith & Read, 2008; Brundrett & Tedersoo, 2018).

Un estudio de las micorrizas en la familia *Salicaceae*, en el periodo 2010-2020, en el hemisferio norte y sur fue efectuado por Aperlo *et al.* (2023). Las especies-híbrido más estudiadas fueron *P. tremuloides*, *P. deltoides*, *S. dasyclados* y *S. caprea*. En dicho documento se indica que la plasticidad y amplia distribución en ambientes diversos, de especies del género *Populus*, se podría vincular a la capacidad de desarrollar micorrizas arbusculares y ectomicorrizas (Quoreshi & Khasa, 2008; citado por Aperlo *et al.*, 2023). La aplicación de hongos micorrícicos constituye una herramienta biotecnológica innovadora para favorecer el establecimiento y desarrollo de diferentes clones.

Arquero y Davel (2017) llevaron a cabo ensayos de intensidad de poda en Neuquén y Río Negro con tres cultivares de *Populus x canadensis* ('Conti 12', '1-214' y 'Guardi'), de los cuales se obtuvo como recomendación aplicar podas que dejen entre el 25 y 50% de copa viva; aplicar la primera poda cuando los árboles más grandes del rodal alcanzan los 5 cm de DAP; y que los levantes de poda siguientes, se efectúen cuando los árboles más grandes alcancen un diámetro en la base de la copa viva de 8-9 cm. De esa forma se obtendría un DCD (diámetro del cilindro con defectos) constante, de entre 12 y 14 cm a lo largo de todo el fuste podado.

En la Región de Aysén, Riquelme *et al.* (2019) evaluaron dos ensayos de álamos (*Populus* spp.) en dos zonas agroclimáticas. En la zona húmeda estudiaron 20 clones, de los cuales los denominados Cima 2 y NM6, presentaron mayor crecimiento y supervivencia. En la zona intermedia se evaluaron 19 clones, de los cuales los clones Unal y árbol 9 tuvieron mejor productividad, en tanto que los clones árbol 9 y árbol 5 (que provenían de material recolectado cerca de la zona de estudio) tuvieron mayor supervivencia (80%). Los demás clones presentaron bajos desempeños en supervivencia y crecimiento, siendo el pH de la zona intermedia (ácido), un factor que pudo afectar la productividad y supervivencia de los clones evaluados.

Davel *et al.* (2015) sintetiza información de establecimiento de álamos y sauces en la Patagonia Argentina, señalando que estos han sido utilizados principalmente como cortinas cortaviento, las que a nivel local son relevantes en cuanto a producción de madera aserrada y leña, encontrándose 19.595 ha de suelo con plantaciones (Achinelli, 2006). En Chubut, Río Negro y Neuquén las cortinas de álamos y sauces aportaron el 84% de la madera extraída de plantaciones en el 2002.

Los mismos autores mencionan, además, que las salicáceas requieren gran disponibilidad de luz y suelos sueltos húmedos, de estructura granular, con elevada capacidad de retención de aire y de agua. Es ideal que los suelos tengan una textura franco arenosa, que sea profundo (2 m), con contenido de materia orgánica de 3 a 5% y que no sea arcilloso. El pH apropiado es de 6.5 a 7. Sin embargo, hay especies que pueden tolerar condiciones distintas a las mencionadas.

### **Álamos Criollos o Negros (*Populus nigra*)**

Algunos autores han informado de diferentes especies de salicáceas para su uso en la zona, señalando que álamos criollos o negros (*Populus nigra* L., “Itálica”) resisten bien el frío, las heladas, la nieve y el viento. Ellos, junto al “álamo chileno” (*Populus nigra* “Thayssiana”) son ideales para la plantación de cortinas rompevientos a lo largo de las acequias y canales de riego (García, 2002; Serventi, 2011), indicándose además que el “álamo chileno” es de crecimiento más rápido (FAO, 1980). Para esta última

especie se mencionan dimensiones de 30 m de altura y 1 m de diámetro, con un gran crecimiento en etapa juvenil, capacidad de adaptarse a una amplia variedad de climas y suelos y facilidad para reproducirse por estacas (Menoyo *et al.*, 1994). Además, puede emplearse sin inconvenientes en zonas de ambiente más seco, como los valles patagónicos y Mendoza (Castiglioni *et al.*, 1960). En el caso de Argentina también presenta una gran adaptación, buenos crecimientos en los primeros años y buena multiplicación por estacas (Menoyo *et al.*, 1994; García, 2011). Se destacan las siguientes variedades:

- *Populus nigra* F-Blanc de Garonne (=cv Jean Pourtet).
- *Populus nigra* F-Vert de Garonne “Moissac”
- *Populus nigra* F-Vert de Garonne “Sehuil”.
- *Populus nigra* F-Vert de Garonne “Naurduze”.
- *Populus nigra* Vereken “Delion”.

### Álamos Carolinos o Deltoides (*Populus deltoides*)

En Argentina se señala que estos álamos son adecuados para la producción de madera, pero los crecimientos son inferiores comparados con los clones de álamos criollos y euroamericanos (Nolting, 1983). Entre los clones introducidos y evaluados en Patagonia se encuentran (Malaspina 1983; Nolting, 1983; García, 2002):

- *Populus deltoides* “71/67 INTA”.
- *Populus deltoides* “Austr. 129/602”.
- *Populus deltoides* “341/69 INTA”.
- *Populus deltoides* “10/69 INTA”.
- *Populus deltoides* “Austr. 106/60”.
- *Populus deltoides* “I-74/51”.
- *Populus deltoides* “67/69 INTA”.
- *Populus deltoides* “Stoneville 71”.
- *Populus deltoides* “I-63/51 Harvard”.
- *Populus deltoides* “I-64/51”.
- *Populus deltoides* “I-94/51”.
- *Populus deltoides* “44/67 INTA”.
- *Populus deltoides* “233/69 INTA”.
- *Populus deltoides* “217/68 INTA DELTA”.

Clones como el Harvard o los australianos 129/602 y 106/60 son más resistentes al ataque de cancrrosis (*Septoria musiva*) que los euroamericanos, pero son más sensibles al viento y a las heladas. García (2002) los recomienda para los valles de los ríos Colorado y Negro (Patagonia norte).

### Álamos Euroamericanos o Canadienses (*Populus x canadensis* (Dode) Guinier)

Este Álamo es un híbrido entre *Populus nigra* y *Populus deltoides*, presenta buenos crecimientos y adaptación a diferentes climas, aunque es susceptible a las heladas (FAO, 1980). Requiere de suelos profundos y exige mayor provisión de agua que otros álamos, no obstante, resisten moderados períodos de sequía. Se adaptan a variadas condiciones climáticas, aunque son sensibles a las temperaturas muy bajas y se hielan con facilidad. En general se multiplican bien por estacas y poseen muy buenos crecimientos.

- *Populus x canadensis* “I-214”: Presenta una plasticidad y crecimiento extremadamente rápido (FAO, 1980), siendo sensible a las heladas. Se le recomienda para producir madera, pero no como formador de cortinas cortavientos. Presenta muy buenos crecimientos; en el Valle del Río Negro existen montes de 25 años de edad con ejemplares de 36 metros de altura y 60 cm de diámetro promedio, alcanzando volúmenes de 4,5 m<sup>3</sup> por árbol (Nolting, 2002). En Argentina es el clon más difundido en las zonas bajo riego

- *Populus x canadensis* "I-154" o "Mussolini": Este clon se obtuvo por el cruzamiento entre *Populus deltoides* "virginiana" y *Populus nigra* "Itálica", presentando un crecimiento es rápido y siendo resistente a la Roya, pero no a la cancrrosis de *Septoria musiva* (Castiglioni *et al.*, 1960).

Otros clones presentes en la región son:

- *Populus x canadensis* "Virginiana de Frinicourt"
- *Populus x canadensis* "I-488"
- *Populus x canadensis* "I Conti 12"
- *Populus x canadensis* "Guardi"
- *Populus x canadensis* "I-262"
- *Populus x canadensis* "Campeador"

Para el norte de la Patagonia, en suelos muy aptos, García (2002) recomienda los clones de *Populus x canadensis* "I-214", "Conti 12" y "Guardi". Éstos combinan buen crecimiento y calidad de madera apropiada. El "I-488" y el "I-262" (en mayor medida) poseen madera más densa, de mejor aptitud tecnológica, pero de menor rendimiento volumétrico. En sitios no muy ventosos ni fríos de Chubut, se han logrado buenos resultados con el "I-214", el "I-488" y el "Conti 12".

Actualmente en Argentina, los álamos más utilizados en los valles de Río Negro y Río Colorado, son los híbridos o euroamericanos. Se utilizan distintos clones según la zona. En el área de El Chocón y Alto Valle el clon más utilizado es el "Guardi", existiendo también plantaciones de "I-214". En la zona del Valle Medio predomina el "Conti 12", aunque también hay plantaciones de "I-214" y "Guardi". Finalmente, en el área de 25 de Mayo (La Pampa) el más plantado es el "Guardi" y, en menor medida, aparecen el "I-214", "I-488" y el "I-63". En esta zona los productores mencionan que "I-214" presenta ramas más gruesas que el "Guardi".

Las especies y clones de Álamo que se están evaluando en la región corresponden a:

- *Populus trichocarpa* "SP 1456"
- *Populus trichocarpa* "SP 125"
- *Populus trichocarpa* "Río Frío".
- *Populus trichocarpa* "SP 919".

### Álamo Blanco (*Populus alba*)

Tolera altas temperaturas, sequías y viento, adaptándose a suelos salinos, donde su reproducción se realiza a través de renuevos de raíz o artificialmente por estacas.

- *Populus alba* L. var *pyramidalis* "Bolleana": Esta variedad se cultiva en Patagonia, principalmente en el valle del Río Negro para cortinas cortaviento (García, 2011), siendo una variedad muy rústica, con mayor resistencia al frío que el álamo blanco tradicional. Es recomendable para sitios con suelos pesados y/o algo salinos, pero siempre debe tenerse en cuenta que, al cortarlo, se producirá una fuerte aparición de renovales a partir de sus raíces gemíferas<sup>2</sup> (García, 2002). Es cultivado en Mendoza, donde tiene un buen desarrollo diametral y gran rendimiento maderable. Por su forma resulta apto para plantaciones con densidades elevadas en cortinas y alineaciones.

### Álamos Grises (*Populus x canescens*)

Estos Álamos corresponden a híbridos entre las subsecciones Trepidiae y Albidae (*P. tremula* x *P. alba*), cuya madera es de buena calidad, pero el fuste no es muy cilíndrico y la poda es más complicada. Se pueden establecer en suelos pesados y con alto contenido en sales (García, 2002).

---

<sup>2</sup> Raíces que tienen la capacidad de producir nuevos brotes o tallos a lo largo de su longitud, lo que permite que un individuo se propague y colonice nuevas áreas (Nota del Editor).

## Sauces en la Patagonia Argentina

En la Patagonia algunas especies o variedades de Sauces se han naturalizado y se encuentran bordeando ríos, arroyos y canales (Amico, 2002). Los más comunes en la región son:

- *Salix humboldtiana* “Sauce criollo”: Es la única salicácea nativa. Se distribuye desde México hasta Argentina (hasta la provincia de Chubut) y Chile. Habita en los bordes de los ríos y arroyos. La madera es blanda y liviana, y se utiliza para la fabricación de envases.
- *Salix fragilis* “Mimbrote”: Es la especie más difundida en la Patagonia donde se lo encuentra formando galerías en la mayoría de los ríos.
- *Salix babylonica* “Sauce llorón”: La especie se utiliza para leña, carbón y algunos artículos manufacturados de menor cuantía soportando terrenos muy anegadizos (Castiglioni & Carreras, 1960).
- *Salix alba* var. *calva* “Sauce álamo”: Es el sauce más intensamente cultivado en Argentina y se mantiene gracias a su notable rusticidad, sanidad y rendimiento. La madera provee de excelente materia prima para las industrias de trituración (celulosa, tableros), para el aserrado (cajonería), debobinado para cajas de fósforos, etc. En el área de la Patagonia se planta principalmente en Río Negro. Dadas las características de los suelos donde habitualmente se cultiva (bajos y pajonales), no puede desarrollar grandes diámetros, ni es posible pretender grandes productividades en volumen (Cozzo, 1995).
- *Salix* “524/43”: Introducido en Chubut (Malaspina, 1983) y en Santa Cruz con muy buenos resultados, donde en los primeros años, plantado en cortina de protección, presenta crecimientos superiores a los del álamo criollo. Se utiliza también, con buenos resultados en el valle inferior del Río Chubut. Es resistente al ataque de pulgones y se adapta a distintos tipos de clima y suelo (Peri, 2004).

Otros sauces cultivados en la región son: *Salix alba* var. *vitelina* “mimbre amarillo”; *Salix viminalis* “mimbre negro”; *Salix caprea* “mimbre” o “sauce japonés”; *Salix nigra* “sauce negro”, *Salix babylonica* x *Salix alba* “A131-25” y *Salix babylonica* x *Salix alba* “A131-27” “sauce 131-27”.

## ANÁLISIS DE SALICÁCEAS PARA LA ZONA DE COYHAIQUE Y PATAGONIA EN CHILE

Existen antecedentes acerca de las atractivas propiedades como combustible de especies de *Acacia*, *Eucalyptus* y *Salix*. Estas plantaciones presentan densidades variables con rotaciones estimadas de 2 a 4 años que requieren medidas de silvicultura intensiva, control de competencia y fertilización. Un aspecto fundamental, es que deben establecerse en suelos no utilizables por la agricultura. Otra premisa a considerar es la identificación de la especie más adecuada para cada sitio, los modelos de manejo más apropiados y las herramientas de gestión que apoyen el proceso.

Al respecto, las especies de *Salix*, son una interesante alternativa de producción dendroenergética en sitios específicos, ya que presentan un rápido crecimiento, que permitiría obtener biomasa en rotaciones cortas (3 a 5 años) y son especies que se adaptan a distintas situaciones edafoclimáticas en el país (Pinilla y Navarrete, 2010; Pinilla y Valenzuela, 2012).

En Chile solo una especie ocurre en forma natural, *Salix humboldtiana* Willd., su distribución abarca América Central y América del Sur y es la única especie del género nativa en Chile. En el país otras especies del género corresponden a *Salix babylonica* (sauce llorón), originaria de China; *S. alba* (sauce blanco), de Europa, N de África y Asia; y *S. viminalis* (sauce mimbre), de Europa y Asia (Barros, 2009; Pinilla et al., 2015).

El sauce aparece como uno de los combustibles de biomasa más prometedores en muchos países. Su rápido crecimiento puede permitir capturar más carbono que otras maderas blandas dentro de una estación de crecimiento (Lamlom & Savidge, 2003). El uso de biomasa como fuente de energía sustituye a combustibles fósiles que incrementan el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, de modo que contribuye a

mitigar el cambio climático y es considerada carbono neutral, por cuanto compensa el carbono liberado en la combustión con el carbono capturado en la madera durante el crecimiento (Kuzovkina & Quigley, 2005).

Especies de *Salix* se usan en distintas partes del mundo como plantaciones comerciales de alto rendimiento, manejadas en monte bajo, principalmente en suelos agrícolas, para abastecer de biomasa a centrales energéticas locales, de producción combinada de energía térmica y eléctrica. En Suecia existirían unas 20.000 hectáreas de sauces en plantaciones bajas de corta rotación, compuestas principalmente de diferentes clones e híbridos de *Salix viminalis*, *S. dasyclados* y *S. schwerinii*. Allá el cultivo del sauce está totalmente mecanizado desde la plantación hasta la recolección. En la fase inicial, se plantan unos 15.000 esquejes por hectárea en dobles filas, para facilitar la fertilización y recolección. La producción aproximada de biomasa de sauce cultivado comercialmente en Suecia es de unas 6 a 12 t/ha/año, según las condiciones del terreno.

En Chile, el *S. viminalis* se usa para la cestería de mimbre (Región de O'Higgins), obteniéndose rendimientos de hasta 12 toneladas de materia seca por ha-año. El poder calorífico de maderas y cortezas de distintas procedencias de esta especie varía entre 3,91 y 4,36 kcal/g (Durán, 1998). Estudios de INFOR concuerdan con estos valores, obteniendo para el poder calorífico un valor de 4,3 kcal/g, lo que confirma la aptitud de esta especie para su uso en la generación de energía (Pinilla & Navarrete, 2010).

Los álamos crecen a lo largo del territorio nacional hasta Tierra del Fuego y desde el nivel del mar hasta los 1.600 metros de altitud, concentrándose las plantaciones entre Aconcagua y Bio Bío, donde entre otros usos se le utilizan como biomasa con fines energéticos (Zsuffa *et al.*, 1996; Dickmann, 2001; Dillen *et al.*, 2010). Existe conocimiento técnico de las variedades y cultivares de estas especies, como también de modelos silvícolas para diferentes objetivos de producción industrial, y para calefacción como energía limpia (Serra *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2008).

Pinilla *et al.* (2021) mencionan que se evaluaron plantaciones experimentales de *Salix alba* y *S. cinerea* establecidos en la Región de Aysén (Figura 1), obteniendo antecedentes de crecimiento y biomasa, caracterización energética y de análisis elemental, señalando que a los ocho años, *S. alba* desarrolló un mayor crecimiento en variables del árbol como en biomasa aérea, con un DAP medio de 4,7 cm y altura de 6,7 m, mientras que *S. cinerea* registró valores de 2,8 cm y 5,5 m para DAP y altura, respectivamente. El Poder Calorífico Inferior fue de 18.009 y 18.163 J/g para *S. alba* y *S. cinerea*, respectivamente, concluyendo que es posible su utilización como materia prima para energía.



Figura 1. Sauces en la zona de Viviana Norte, Coyhaique, región de Aysén.

Sin embargo, en la Región de Aysén no existen mayores antecedentes acerca de especies para su uso en energía, a excepción de algunos estudios realizados por INIA e INFOR con especies de Álamos y *Salix*. Por lo mismo, se requieren mayores antecedentes de las especies y de su manejo para el abastecimiento seguro de unidades de generación que requieran de biomasa para su funcionamiento. INFOR no registra en la Región de Aysén plantaciones de Álamo, pero si se señala la existencia de cerca de 1.600 ha sin identificar, cubiertas por otras especies, parte de las cuales podrían ser especies de álamos. A ello se agrega una superficie indeterminada de álamos en la forma de cortinas cortavientos, formación frecuente en la región, más una superficie con presencia de especies de *Salix* en cercanías de cursos de agua o zonas húmedas.

Se menciona que la introducción de híbridos y cultivares de salicáceas involucra ventajas económicas que mejoran la rentabilidad del negocio forestal como consecuencia del rápido crecimiento, corta rotación y ventajas sociales asociadas a alternativas de producción para pequeños y medianos propietarios. Lo anterior supone también ventajas ambientales debido a la función de protección de los árboles a suelos fluviales, inundados y erosionados, y a su aporte a la mitigación de problemas de contaminación. Al respecto se puede señalar que Flores *et al.* (2011) mencionaba que la Región de Aysén posee cerca de 4,5 millones de hectáreas definidas como de considerable riesgo de erosión.

Riquelme *et al.* (2019) señalan que clones de álamo creciendo en la zona húmeda de la Región de Aysén, presentaron a los cinco años diámetros de 1,72 cm, alturas totales de 3,05 m y supervivencias de 75%. Los mismos autores infieren que los clones de álamo vieron favorecido su crecimiento debido a la disponibilidad hídrica, y a su capacidad de adaptación a zonas húmedas. Mencionan valores máximos de supervivencia a los cinco años de edad de 96%, lo que indicaría que la zona húmeda de Aysén es apta para su crecimiento y desarrollo. Coincidentemente, Weisgerber (1999), indica que álamos de la sección Aigeros se caracterizan por resistir el frío y el viento, y que árboles adultos pueden alcanzar hasta 40 m de altura y más de 2 m de diámetro.

Las pocas exigencias climáticas y de suelo, en conjunto con su plasticidad, son atributos que contribuyen al rápido crecimiento de estos clones. Particularmente, el clon Neva suele presentar un buen nivel productivo, considerándosele como un clon de fácil manejo silvícola (gran dominancia apical, ramas laterales pequeñas y fáciles de podar), como contraparte, resulta muy susceptible a la *Melampsora*<sup>3</sup> (U. de Chile, 1998). Por el contrario, Riu *et al.* (2008) señalan que en la zona húmeda se obtienen supervivencias de tan solo un 20% a los cinco años, coincidente a su vez con reportes que señalan una supervivencia cercana a un 11% en una plantación de clones de álamo de 10 años de edad en San Carlos (Mendoza, Argentina)

En el estudio de Riquelme *et al.* (2019) el clon Neva presentó crecimientos en diámetro muy inferiores respecto de la media en la zona húmeda de Aysén (solo 0,66 cm), concluyéndose que sería inadecuado para esa zona de Aysén. Contrariamente, en un estudio efectuado en Barcelona, España, donde se comparó el crecimiento en diámetro de diferentes clones de Álamo, el clon Neva obtuvo resultados favorables a la misma edad, registrando diámetros de 17,5 cm (U. de Chile, 1998).

Al evaluar la supervivencia, a los siete años, de álamos creciendo en la zona intermedia de Aysén (sector Valle Simpson) se obtuvo un valor medio de tan solo 36%. Sin embargo, algunos clones individuales lograron valores de hasta 80%, demostrando así su adaptación a las condiciones imperantes en la zona intermedia de Aysén. En tal evaluación el mejor desempeño en diámetro, altura y rendimientos fue para el clon Unal. Este presentó una alta productividad, fustes rectos, diámetros de 5,02 cm, y alturas de 3,05 m. Adicionalmente, se menciona que el clon Unal tiene amplitud edáfica, siendo favorecido por suelos de pH neutro a ligeramente alcalinos y crece bajo precipitaciones superiores a 300 mm/año, sin embargo, a pesar de su destacable desempeño alcanzó una supervivencia de tan sólo un (36,6%). Lo anterior puede atribuirse a que el clon Unal, ve afectado particularmente su desarrollo en suelos ácidos (U. de Chile, 1998).

---

<sup>3</sup> *Melampsora* es el género del hongo que provoca la roya del álamo. Esta roya es una de las principales enfermedades que afecta los álamos en el mundo, provoca defoliación y hasta la muerte de los individuos afectados (Nota del Editor).

Un estudio realizado en Argentina (Trevelin) menciona que al primer año de edad se obtienen diámetros cercanos a 1,6 cm (Lugano y Amico, 2001), en tanto otro estudio en el mismo país señala que a los dos años de edad se logran diámetros de 3 cm (Menoyo *et al*, 1993). Ambos valores se consideran respuestas favorables, pero no comparables a las obtenidas en el sitio de estudio en Aysén debido a las diferentes condiciones agroclimáticas imperantes en este último, donde los álamos crecen con temperaturas mínimas de -0,4C° y con presencia de déficit hídrico estival (Hepp & Stolpe, 2014).

Rueda *et al.* (2016) describen al clon Bocculari con características de resistencia al viento y al frío, pero que no ha presentado adecuados desempeños, lo que se señala tendría su origen en su sensibilidad a suelos ácidos, como es el caso de la zona intermedia de Aysén, descartando con ello su uso.

Las Salicáceas, y en especial los álamos, provienen de zonas con inviernos fríos y algo rigurosos, por lo cual las bajas temperaturas, dentro de cierto rango, no constituyen un factor climático limitante de primer orden (Leonardis, 1960).

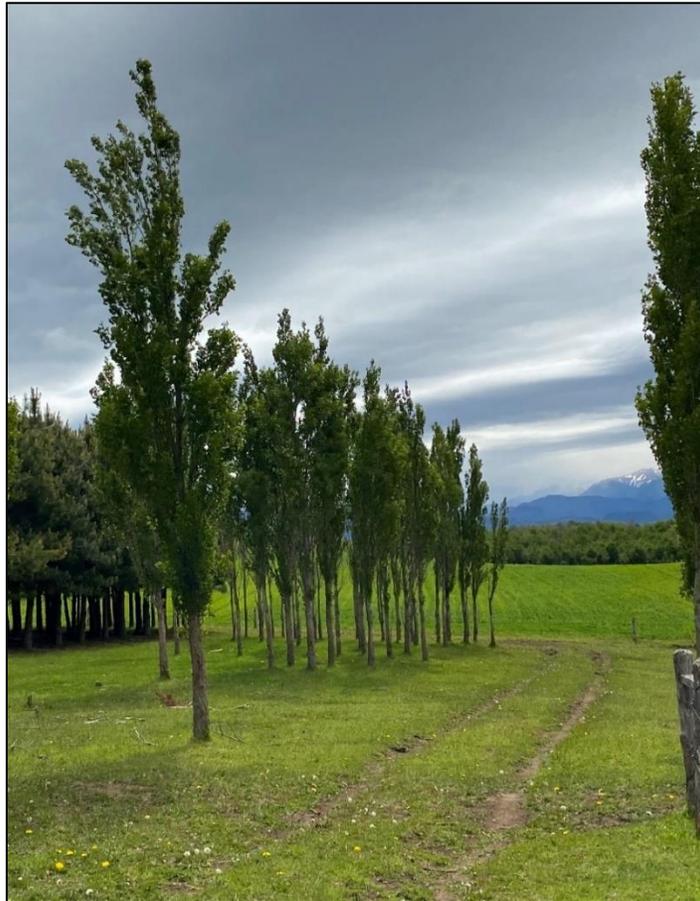


**Figura 2.** Leña de Álamo en Cerro Castillo, Coyhaique.

Para introducir y establecer álamos resistentes al frío en la Región de Aysén se requiere identificar clones adaptados a las condiciones de suelo y clima de cada sector de la región. Esta adaptación debe ser el primer antecedente para posteriormente destacar su uso en la región, como un material adecuado, promisorio, para la producción de biomasa para energía, ya sea como astillas térmicas y/o pellet.

Recientemente Raffaelli *et al.* (2022) comentan que las especies del género *Populus* son importantes en Argentina, donde ocupan el tercer lugar en superficie forestada y volumen de madera generado, detrás del pino y el eucalipto. Agrega que su madera se utiliza en una variedad de aplicaciones y que su industrialización genera residuos que no siempre son utilizados. Respecto de los clones se mencionan la

existencia de *Populus x euroamericana*, 'I-214', de la Patagonia Norte y *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' del Delta del Río Paraná.



**Figura 3.** Ensayo clones de Álamo en Valle Simpson, Coyhaique.



**Figura 4.** Ensayo clones de Álamo en Valle Simpson, Coyhaique.



**Figura 5.** Banco clonal de Populus de INFOR Sede Coyhaique y labores de manejo.



**Figura 6.** Estacas provenientes del Banco clonal de Populus de INFOR Sede Coyhaique.

Clones de álamo han demostrado buena aptitud para ser utilizados con fines energéticos, ya sea como madera o como el residuo sólido del proceso de pirólisis (confección de carbón vegetal). Particularmente 'I-214' exhibe el mejor desempeño en relación al poder calorífico, contenido de cenizas y proporción relativa de volátiles. Este clon y 'Australiano, 129/60' presentaron valores favorables de contenido de humedad, cenizas y poder calorífico Raffaeli *et al.* (2022). Sin embargo, el contenido de volátiles resultó mayor de lo esperado, posiblemente atribuible al protocolo de laboratorio utilizado, afectando así el porcentaje de carbono fijado.

La respuesta en crecimiento de clones adecuados para cada zona agroclimática de la Región de Aysén ofrecería ventajas económicas que aporten a la rentabilidad del negocio forestal, como consecuencia del rápido crecimiento y corta rotación. Adicionalmente agregan ventajas sociales y ambientales, al brindar nuevas alternativas a los pequeños y medianos propietarios, como la conformación de plantaciones o bosques para energía.

Se requiere diversificar la oferta de biomasa para energía en el área de Coyhaique y Patagonia chilena. Por lo mismo, es necesario incorporar especies adaptadas a las condiciones de sitio del área objetivo y que sean compatibles con la generación de biocombustible para uso térmico, sanitario o para electricidad.

La adaptación y crecimiento de especies de Salicáceas a las condiciones de suelo y clima del sector objetivo debe ser una acción de interés, en apoyo a los procesos de mejora de la calidad de los Biocombustibles y de su uso, apoyando programas de descontaminación ambiental en beneficio de los habitantes de la región.

Se requiere ampliar este tipo de estudios en la zona de Coyhaique y Patagonia chilena de modo de incrementar las alternativas de oferta de biomasa para su uso en energía y con ello, la selección de especies con mejor desempeño para producción de biomasa y Biocombustibles.

## CONCLUSIONES

Los antecedentes obtenidos de diversos estudios relativos a la utilización de salicáceas en la zona de Coyhaique y Patagonia destacan su potencial para uso en plantaciones que, bajo silvicultura intensiva y en suelos adecuados, podrían generar importantes volúmenes de biomasa para uso energético.

Tales especies pueden adquirir una importancia creciente para el desarrollo de las economías locales y regionales, teniendo la capacidad de complementar la rentabilidad de las pequeñas unidades de producción, mediante el ingreso anual generado por su utilización para la generación de leña, e incluso *pellets*. Por otra parte, el empleo de especies de salicáceas adaptadas para la zona de Coyhaique y Patagonia chilena, permitiría además contribuir a recuperar suelos degradados y entregar adecuada información para propuesta de protocolos o normativas de manejo y sus costos.

Es interesante generar información base respecto al desempeño de las salicáceas en las actuales condiciones en que se desarrollan en Coyhaique y la Patagonia, la mayoría de ellas formaciones sin manejo y/o con escasa mejora genética, que constituye la línea base para las futuras ganancias en biomasa por unidad de superficie para biocombustibles sólidos (Leña), utilizando las herramientas tecnológicas aportadas por la silvicultura, manejo y avances en mejoramiento genético.

La información requerida debe provenir de una red de unidades experimentales que considere procedencias, técnicas intensivas de establecimiento y diferentes espaciamientos, y a partir de los resultados generar un programa para el mejoramiento genético.

Paralelamente, se requiere caracterizar la biomasa y los biocombustibles que se generan a partir de las plantaciones y el manejo de estas salicáceas. Para esto es necesario determinar los factores físicos y químicos de muestras de biomasa y de sus biocombustibles derivados y contrastarlos con los requisitos de las normas oficiales, particularmente en el marco de la Ley 21.499 de Biocombustibles del Ministerio de Energía

Considerando que no se dispone de datos sobre superficies cultivadas en el área de Coyhaique y Patagonia chilena, es aconsejable generar un estudio que determine las formaciones con estas especies en la zona de interés, y de la superficie potencial donde podrían establecer estas especies. Tal estudio debe priorizar las áreas cercanas a los principales centros de consumo y presencia de productores de biocombustibles, por ejemplo, de leña en la zona de interés, y generar zonas de abastecimiento. Se requiere también determinar rendimientos en MS/árbol y tMS/ha, suponiendo una plantación con fines energéticos.

Una plantación de salicáceas con fines energéticos, instalada mediante técnicas intensivas de establecimiento, en corta rotación y con material genético selecto, permitiría obtener biomasa para su uso en producción de biocombustibles.

## REFERENCIAS

- Achinelli, F.G. (2006).** Silvicultura de álamos y sauces en la Pampa Húmeda. Actas de la I Jornada Argentina de Salicáceas. Buenos Aires, Argentina. Pp: 21-36.
- Almeida, P., Proux-Wera, E., Churcher, A., Soler, L., Dainat, J. & Pucholt, P. (2020).** Genome assembly of the basket willow, *Salix viminalis*, reveals earliest stages of sex chromosome expansion. BMC Biol., 18(1): 1-18. <https://doi.org/10.1186/s12915-020-00808-1>
- Amico, I. (2002).** Crecimiento de distintos clones de álamos en vivero. Cartilla. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Esquel. Argentina.
- Aperlo, D., Schrohn, H., Fernández, N. & Mestre, M.C. (2023).** Micorrizas y salicáceas: ¿qué sabemos del período 2010-2020 y hacia dónde vamos? Bosque, 44(1): 9-22. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002023000100009>

- Arquero, D & Davel, M. (2017).** Determinación de la época de poda en sistemas silvopastoriles con álamos en Patagonia Norte Argentina. *Ciencia & Investigación Forestal*, 23(3): 21-30. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2017.483>
- Baettig, R., Yáñez, M. & Albornoz, M. (2010).** Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: Estado del arte. *Bosque*, 31(2): 89-99. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200002>
- Barros, S. (2009).** Álamos y Sauces, Las Salicáceas en el Mundo y en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 15(2): 243-254. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2009.325>
- Brundrett, MC. & Tedersoo, L. (2018).** Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4): 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Buchman, D., Jackson, J., Berguson, WE., McMahon, BG., Nelson, ND., DuPlissis, J. & Host, GE. (2020).** Grower's guide for hybrid poplar plantations for biomass production. Natural Resources Research Institute, University of Minnesota Duluth, Technical Report NRR/ITR-2020/15. 15 p.
- Castiglioni, C. & Carreras, L. (1960).** Implantación de bosques comerciales. INTA. Buenos Aires. 239 p.
- Cornejo, E. (2016).** Álamo: Alternativa para la diversificación maderera. *Sustainability, Agri., Food and Environmental Research*, 4(2): 28-29. <https://doi.org/10.7770/safer-V4N2-art1024>
- Cozzo, D. (1995).** Silvicultura de Plantaciones Maderables, Orientación Gráfica. Tomo II. Buenos Aires. Pp: 433-458.
- Davel, M., Arquero, D., Barbé, A. & Havrylenko, S. (2015).** Los álamos y los sauces en la región Patagónica Argentina. CIEFAP.
- Dickmann, DI. (2001).** An overview of genus *Populus*. En: Dickmann, DI., Isebrands, JG., Eckenwalde, JE. & Richardson, J. (Eds). *Poplar culture in North America*. NRC Research Press. Ottawa, Ontario, Canada. Pp: 1-42.
- Dickmann, DI. (2006).** Silviculture and biology of short rotation woody crops in temperate regions: Them and now. *Biomass & Bioenergy*, N° 30. Pp: 696-705. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.02.008>
- Dillen, SY., Rood, SB. & Ceulemans, R. (2010).** Growth and Physiology. En: Jansson, S. *et al.* (Eds). *Genetics and Genomics of Populus: Plant Genetics and Genomics: Crops and models 8*. Springer Science. Pp: 39-63. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1541-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1541-2_3)
- Durán, C. (1998).** Caracterización de *Salix viminalis* acorde a su contenido de extraíbles y capacidad energética total [monografías].: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Concepción, Chile. 43 p.
- FAO. (1980).** Los Álamos y los sauces. Colección FAO: Montes N°10. Roma. 349 p.
- Flores, JP., Espinosa, M., Martínez, E., Henríquez, G., Avendaño, P., Torres, P., Ahumada, I. et al. (2011).** Determinación de la erosión actual y potencial del territorio de Chile. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Santiago. 292 p.
- García, J. (2011).** El cultivo de las Salicáceas en los valles irrigados de la Patagonia, pasado, presente y futuro. 3er Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina. Neuquén, Argentina.
- García, J. (2002).** Forestación con Salicáceas en áreas bajo riego en la Patagonia. En: <http://www.sagpva.mecan.gov.ar/new/00/forestacion/deleg/manusali.pdf>
- Hepp, C. & Stolpe, NB. (2014).** Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia Occidental (Aysén). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación Tamei Aike. Coyhaique, Aysén Patagonia, Chile. 160 p.
- Isebrands, JG. & Karnoky, DF. (2001).** Environmental benefits of Poplar culture. In: Dickmann, DI., Isebrands, JG., Eckenwalder, JE. & Richardson, J. (Eds). *Poplar Culture in North America*. NRC Research Press. Ottawa, Ontario, Canada. Pp: 207-218.

- Karp, A. & Shield, I. (2008).** Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist*, 179(1): 15-32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02432.x>
- Keoleian, GA. & Volk, TA. (2005).** Renewable energy from willow biomass crops: life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Science*, N°24. Pp:385-406. <https://doi.org/10.1080/07352680500316334>
- Kuzovkina, Y. & Quigley, M. (2005).** Willows beyond wetlands: Uses of *Salix* species for environmental projects. *Water, Air and Soil Pollution*, N° 162. Pp: 183-204. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-6272-5>
- Lamlom, SH. & Savidge, RA. (2003).** A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, N° 25. Pp: 381-388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)
- Leonardis, R. (1960).** Silvicultura de las Salicáceas. Implantaciones de bosques comerciales. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. Pp: 193-206.
- Lugano, L. y Amico, I. (2001).** Producción experimental de salicáceas en vivero. VI Jornadas Técnicas de Viveristas Forestales de la Patagonia. 15 y 16 de noviembre de 2001, Esquel, Chubut. SAGPyA, AIFCh.
- Luquez, V., Bartolozzi, M. & Martínez, S. (2022).** Utilización de álamos y sauces para la producción de biomasa para energía. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 121(1):09. <https://doi.org/10.24215/16699513e091>
- Malaspina, E. (1983).** Introducción de salicáceas en la región patagónica. V Congreso Forestal Argentino. 17-22 octubre. Santa Rosa – La Pampa. Pp: 4.256-4.264.
- Menoyo, H., Mombelli, O. & Jones, N. (1993).** Estudios de las masas naturales del género *Salix* en dos zonas de la provincia de Chubut. Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Comisión VI. Paraná, Entre Ríos, 1993. AFOA.
- Niemczyk, M. (2021).** The effects of cultivar and rotation length (5 vs 10 years) on biomass production and sustainability of poplar (*Populus spp.*) bioenergy plantation. *GCB Bioenergy*, 13(6): 999-1.014. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12827>
- Nolting, J. (1983).** Determinación de rendimiento de madera de un monte de *P x euroamericana cv I-214* en el valle de Río Negro. V Congreso Forestal Argentino. Tomo 1. 17-22 Octubre. Santa Rosa – La Pampa. Pp: 1.36-1.38.
- Nolting, J. (2002).** Un clásico de la populicultura – Álamos: el *P. x euroamericana cv "I-214"*. *Revista Rompecabezas*. 8(35): 30-33.
- Peri, P. (2004).** Clon *Salix 524/43*. Sauce de crecimiento rápido, resistencia y adaptabilidad. En: <http://www.ecampo.com/?event=news.display&id=8063A6C7-089D-43A2-BD4864EBD7500F2C&>
- Pilipovic, A., Orlovic, S., Nikolic, N., & Galic, Z. (2006).** Investigating potential of some Poplar (*Populus sp.*) clones for phytoremediation of nitrates through biomass production. *Environmental Applications of Poplar and Willow Working Party*. 18-20 May 2006, Northern Ireland.
- Pincemin, JM., Monlezun, SJ., Zunino, H., Cornaglia, PS. & Borodowski, E. (2007).** Sistemas Silvopastoriles en el Delta del Río Paraná: Producción de materia seca y estructura de gramíneas templadas bajo Álamos. APPA ALPA-Cusco, Perú.
- Pinilla, J.C. & Navarrete, M. (2010).** Informe Técnico Proyecto 1: Desarrollo productivo de los bosques, de la industria forestal y fomento del uso de la madera. Promoción del uso dendroenergético de los productos forestales madereros, el caso de *Acacia dealbata* y *Salix sp.* Informe de proyecto Ministerio de Agricultura de Chile. Instituto Forestal, Sede Biobío. Concepción, Chile. 50 p.
- Pinilla, JC. & Valenzuela, C. (2012).** Algunos antecedentes en la búsqueda de opciones económicas para el abastecimiento de biomasa dendroenergética en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 18(2): 69-90. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2012.388>
- Pinilla, J C., Chung, P. & Navarrete, M. (2015).** El Sauce Chileno (*Salix humboldtiana* Willd) en la Región del Biobío y su Uso Potencial en Bosques Plantados. Informe Técnico N° 202. Instituto Forestal, Chile. 40 p.

- Pinilla, J.C., Riquelme, F. & Acuña, B. (2021).** Antecedentes iniciales para la utilización de especies de *Salix* como biomasa para energía en la Región de Aysén. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(3): 63-75. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.557>
- Raffaeli, N., Spavento, E. & Barotto, A. (2022).** Caracterización dendroenergética de la madera y el carbón de dos clones de Álamo. XXXVI Jornadas Forestales de Entreríos, Concordia, octubre de 2022. En: [https://www.researchgate.net/publication/364598899\\_Caracterizacion\\_dendroenergetica\\_de\\_la\\_madera\\_y\\_el\\_carbon\\_de\\_dos\\_clones\\_de\\_alamo](https://www.researchgate.net/publication/364598899_Caracterizacion_dendroenergetica_de_la_madera_y_el_carbon_de_dos_clones_de_alamo)
- Reyes, R., Sanhueza, R., Schueftan, A., et al. (2021).** Consumo de leña y otros biocombustibles sólidos en la región de Aysén: adopción acelerada del pellet en la ciudad de Coyhaique y predominio de la leña en el resto de la región. *Boletín Bosques Energía y Sociedad* N° 14. Instituto Forestal. Santiago, Chile. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31338>
- Riquelme, F., Salinas, J., Gutiérrez, B. & Pinilla, J.C. (2019).** Evaluación de ensayos de introducción de álamos en dos zonas agroclimáticas de la región de Aysén. *Ciencia & Investigación Forestal*, 25(3): 7-22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.518>
- Riu, N., Bustamante, J., Calderón, A., Pérez, S., Settepani, V. & Zanetti, R. (2008).** Comportamiento de clones de Álamos en San Carlos. Mendoza, Argentina. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XL. N°1. Año 2008. Pp: 79-89.
- Rodríguez, M. Luquez, V. (2016).** Poplars and willows responses to flooding stress (Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), CONICET – FCAyF UNLP, La Plata, Argentina). Pp: 103-130. [https://www.researchgate.net/publication/330673483\\_Poplars\\_and\\_Willows\\_Responses\\_to\\_Flooding\\_Stress#ullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/330673483_Poplars_and_Willows_Responses_to_Flooding_Stress#ullTextFileContent)
- Rueda, J., Padró, A., Grau, J.M., Sixto, H., Villar, C., García Caballero, J.L., Martínez Sierra, F. et al. (2016).** Clones de chopos del Catálogo Nacional de Materiales de Base. Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Junta de Castilla y León. Valladolid, España. 72 p.
- Schultz, R.C., Colletti, J.P., Isenhardt, T.M., Márquez, C.O., Simpkins, W.W. & Ball, C.J. (2000).** Riparian forest buffer practices. In: Garrett, H.E., Rietveld, W.J. & Fisher, R.F. (Eds). *North American Agroforestry: An Integrate Science and Practice*. Am. Soc. Agron., Madison, WI. Pp: 189-281.
- Smith, S.E. & Read, D. (2008).** *Mycorrhizal Symbiosis*. Third Edition. Academic Press. London. Pp: 42-90. <https://doi.org/10.1016/B978-012370526-6.50004-0>
- Serra, M.T., Torres, J. & Grez, I. (2002).** Breve historia de la introducción en Chile del Álamo (*Populus nigra* L. var *italica* (Moench) Koehne) y el desarrollo de ejemplares siempreverdes. *Chloris Chilensis*, año 5, N°2. [URL:http://www.chlorischile.cl/alamos/alamos.htm](http://www.chlorischile.cl/alamos/alamos.htm).
- Serventi, N. (2011).** Las cortinas forestales en los valles irrigados de la Norpatagonia. III Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina.
- Wang, X., Newman, L.A., Gordon, M.P. & Strand, S.E. (1999).** Biodegradation of carbon tetrachloride by Poplar trees: Results from cell culture and field experiments. In: Leeson, A. & Allenman, B.C. (Eds). *Phytoremediation and Innovative Strategies for Specialized Remedial Applications*. Battelle Press. Columbus, Ohio, USA. Pp: 133-138.
- Weisgerber, H. (1999).** *Populus nigra* Linné, 1753. *Encyklopade der Holzgewachse* 16, 24p
- Wullschleger, S.D., Meinzer, F.C. & Vertessy, R.A. (1998).** A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiol.*, N° 18. Pp: 499–512. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.8-9.499>
- Zamudio, F., Baettig, R. & Guerra, F. (2008).** Origen y futuro del cultivo del Álamo en Chile. Monografía Proyecto FONDEF D0411027. Universidad de Talca. Talca, Chile. 34 p.
- Zsuffa, L., Giordano, E., Pryor, L.D. & Stettler, R.F. (1996).** Trends in Poplar culture: Some global and regional perspectives. En: Stettler, R.F., Bradshaw, H.D. Jr., Heilman, P.E. & Hinckey, T.M. (Eds). *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. Pp: 515-539.



---

APUNTE

## Ficha técnica para plantación de *Araucaria araucana*

María Molina Brand<sup>1\*</sup>; Hernán Soto Guevara<sup>1</sup>; Roberto Ipinza Carmona<sup>2</sup> & Marlene González González<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Forestal, sede Biobío.

<sup>2</sup>Instituto Forestal, sede Los Ríos.

<sup>3</sup>Instituto Forestal, sede Metropolitana.

\*Autor para correspondencia: mmolina@infor.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.607>

Recibido: 23.03.2024; Aceptado 18.04.2024

---

### RESUMEN

Se presenta una síntesis de consideraciones prácticas para realizar plantaciones de *Araucaria araucana* con fines de conservación, o de cumplimiento de los requisitos de devolución al medio natural impuestos por la convención CITES para la producción y exportación de las especies incluidas en su anexo I. Entre los puntos desarrollados se incluyen aspectos de producción de plantas, preparación del suelo, plantación propiamente tal, protección y mantención de las plantas establecidas, todos ellos con la finalidad última de aumentar el prendimiento y supervivencia de las plantas plantadas.

**Palabras clave:** *Araucaria araucana*, plantación.

### SUMMARY

A synthesis of practical considerations is presented for carrying out *Araucaria araucana* plantations for conservation purposes, or for compliance with the requirements for return to the natural environment imposed by the CITES convention for the production and export of the species included in its Annex I. Among the topics developed are included aspects of plant production, soil preparation, planting itself, protection and maintenance of established plants, all of them with the ultimate goal of increasing the yield and survival of the planted plants.

**Key words:** *Araucaria araucana*, plantation.

---

## INTRODUCCIÓN

La araucaria (*Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch) es una conífera de gran longevidad, endémica del sur de Chile y Argentina; para ambos países es una especie emblemática y de gran importancia para las comunidades mapuches. Es una especie protegida por la convención CITES y en Chile fue declarada Monumento Natural, por lo que cuenta con protección especial y constituye un patrimonio nacional que contribuye a la belleza escénica y a la protección de las cuencas altas de las regiones de Biobío, Araucanía y Los Ríos.

En Chile, el Tipo Forestal Araucaria cubre una superficie de 252 mil hectáreas (Álvarez *et al.*, 2022) y se lo encuentra en zonas de Precordillera Andina en las regiones de La Araucanía y Los Ríos y en sectores de Cordillera de la Costa de la región del Biobío; se ubica en rangos altitudinales de 900 a 1.700 msnm y gran parte de su superficie está dentro de Parques Nacionales, como Nahuelbuta, Conguillío, Villarrica y otros. Es una especie clasificada como amenazada, que en su distribución costera se la considera como en Vías de Extinción y en su distribución andina en categoría Vulnerable.

Recientemente se identificó a *Pewenomyces kutranfy* como el agente causal del cancro de la araucaria, el principal componente del síndrome del Daño Foliar de Araucaria (DFA) (Balocchi *et al.*, 2021). Además, se descubrieron tres nuevas especies de *Pewenomyces* asociadas al daño causado por *P. kutranfy*. La pérdida de vitalidad provocada por este hongo patógeno, está afectando más del 90% de la distribución biogeográfica de la especie<sup>4</sup> (Reyes, 2022), llegando a causar la muerte de los árboles en menos de un año.

Este documento entrega antecedentes técnicos y operativos para aumentar la supervivencia de plantaciones de *Araucaria araucana*, constituyendo una guía para quienes estén interesados en plantar esta especie, pensando en su conservación. También resulta de utilidad para las actividades de devolución al medio natural estipuladas en la Ley CITES N° 20.962, como medida de compensación posterior a la autorización de producción artificial y exportación de ejemplares de araucaria, en el marco de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES), suscrito por Chile.

## CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA LA PLANTACIÓN DE ARAUCARIA

### Origen de las Plantas

Es importante que el sector definido para establecer la plantación sea parte de la distribución de la especie, donde crece naturalmente. En cualquier caso, se deben utilizar plantas de la misma distribución u origen a las del sector escogido. En la **Figura 1** se muestra la distribución de la especie en Chile, la que comprende desde el sur de la Región del Biobío (provincia del Biobío, 37° 20' S), hasta el norte de la Región de Los Ríos (Provincia de Valdivia, 40° 00' S) (Hechenleitner *et al.*, 2005).

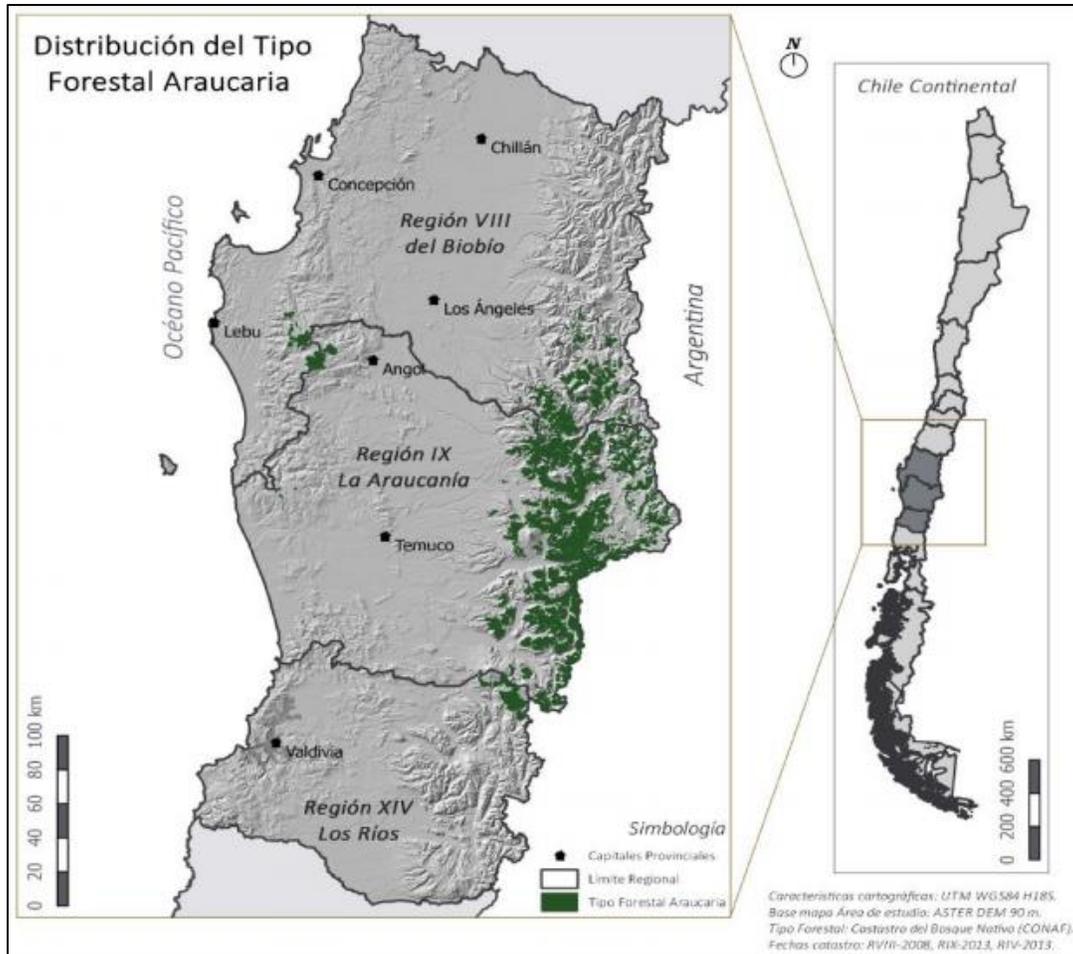
### Producción y Calidad de las Plantas a Establecer

Las plantas de araucaria se producen por semillas, comúnmente conocidas como piñones. Una vez recolectadas, estas semillas pueden almacenarse brevemente en cámaras de frío dentro de mallas, sin embargo, es importante recordar que se trata de una especie con semillas recalcitrantes, es decir, que pierden su viabilidad rápidamente debido a la deshidratación. Una técnica efectiva para la siembra en bandejas consiste en remojar previamente las semillas en agua durante 48 horas dentro de una cámara frigorífica. Tras este periodo de remojo, se procede a cortar la punta de la semilla. El piñón así cortado se entierra luego en la cavidad de la bandeja, dejando la semilla colocada de forma diagonal. Esta orientación, junto con el previo remojo, favorece su germinación y el exitoso crecimiento de la planta (**Figura 2**).

Durante la viverización debería obtenerse una planta adecuada en cuanto a tamaño (15 cm aproximadamente) y sistema radicular (una raíz principal y muchas raicillas secundarias ocupando todo el sustrato del contenedor) en una temporada, efectuándose la siembra entre abril-mayo para tener la planta plantable en mayo a junio del año siguiente en el mismo contenedor (**Figura 3**). En la medida que el contenedor original sea de mayor tamaño también se puede obtener una planta adecuada para la plantación con clasificación 2/0, lo que indica 2 temporadas en el mismo contenedor. Según lo observado, si el contenedor es de bajo volumen de sustrato (100 cc o menos) en la medida que la planta se desarrolla la raíz principal en forma natural al no encontrar más espacio en el sentido vertical comienza a girar en sí misma en el sentido opuesto y a dañarse significativamente.

---

<sup>4</sup> Reyes, M. Universidad de la Frontera y consultor de CONAF. Taller CITES *Araucaria araucana*, Valdivia, mayo 2022. Comunicación personal.



**Figura 1.** Distribución de *Araucaria araucana* en Chile (Cortesía de Paulina Vidal Páez y Mauricio Reyes Schencke). Servicio Forestal de los Estados Unidos, 2017.



**Figura 2.** Etapas de siembra de semillas de *Araucaria araucana* en bandejas, una vez cosechadas las semillas se aplica un pre-tratamiento germinativo, embebiendo las semillas en agua a 4°C por 48 horas. Posteriormente se corta la punta y se dispone diagonal a la cavidad. Producción de araucaria en Vivero Carlos Douglas de la empresa CMPC.

## Época de Plantación

La época ideal es fines de otoño y comienzos de invierno antes de la precipitación nival. Después de ello la operación para plantar es extremadamente complicada y de alto costo sin considerar que los efectos del congelamiento del suelo pueden afectar seriamente a la raíz de la planta por los denominados “descalces” que involucran el levantamiento de las plantas por diferencias de congelamiento en el suelo que circunda a la planta provocando el corte violento de las raíces.

Alternativamente, también puede plantarse una vez que la nieve se ha derretido en el sector de plantación a fines de septiembre o primera semana de octubre, sin embargo, es una última instancia muy arriesgada porque es necesario que exista lluvias o acceso al agua al menos por un mes y medio después de la plantación. Es vital la humedad del suelo para el rápido y adecuado desarrollo de las raíces, tanto por asentamiento de la planta como también para mejorar la eficiencia del uso del agua y fortalecimiento de la planta y de ese modo soportar las temperaturas y alta radiación solar que se produce en los sectores de distribución de *Araucaria* (Cordilleras de Los Andes y de Nahuelbuta) durante el verano.



**Figura 3.** Planta de *Araucaria araucana* 1/0. Producida en Vivero Carlos Douglas, Empresa CMPC. Yumbel, Temporada 2018.

## Preparación del Suelo

- *Temporada previa a la estación nival (mayo-junio)*

Hoyadura y “casilla cultivada” para plantación inmediata: Hoyadura se denomina en este caso preparación de la casilla donde se localizará la planta que idealmente debe tener 50 cm de alto, 50 cm de ancho y 50 cm largo (casilla) se extrae la tierra del hoyo o espacio generado y se vuelve a ingresar esta tierra

previamente mullida (cultivada) de modo de otorgarle porosidad y disminuir la compactación de los terrones que se han extraído. La devolución de esta tierra al hoyo es en 2 partes, primero hasta la mitad del alto de la hoyadura y el resto de la tierra, también mullida, una vez que se ingrese la planta en el centro de la hoyadura.

- *Temporada post estación nívosa (septiembre-octubre)*

Hoyadura y “casilla cultivada” en meses previo a la plantación: Cuando no sea posible plantar antes de la temporada nívosa se recomienda realizar el mismo procedimiento anterior antes de la temporada nívosa y dejar preparada la casilla con toda la tierra extraída ya cultivada en su interior y reiniciar la plantación una vez que se ha derretido la nieve en el terreno.

Esta temporada, posterior al derretimiento de la nieve, no es la época ideal para plantar, pero puede ocurrir que no fue posible obtener las plantas en la época más adecuada. Este sistema permitirá que la plantación tardía de las plantas se haga con mayor rapidez evitando que las plantas se deterioren en mayor medida. Igualmente involucrará tener mayor atención en cómo se están desempeñando las plantas sobre todo si la temporada de primavera tiene bajo nivel de precipitaciones. Para este tipo de plantación se requerirá considerar la aplicación de gel higroscópico a las raíces de las plantas durante la plantación. Aun cuando se realice la aplicación de gel a las raíces se deberá evaluar la aplicación de algún riego suplementario a cada una de las plantas (2 L) si estas presentan algún grado de marchitez o decoloración de las hojas durante la temporada estival.

Para la confección de las casillas de plantación se utiliza la denominada pala neozelandesa o pala plantadora. Junto con la plantación se recomienda aplicar fertilizante de lenta entrega NPK granulado (tipo Basacote ® 9 meses). Se considera un valor referencial de 15 g por planta, aplicado directamente a la casilla. En el **Cuadro 1** se presenta la composición química de este producto.

**Cuadro 1.** Proporción de macro y micronutrientes del fertilizante granular Basacote Plus ®. (No contiene cloro).

Macroelementos	Proporción
<b>Nitrógeno total (N)</b>	16,0 %
Nitrógeno Nítrico	7,4 %
Nitrógeno Amoniacal	8,6 %
<b>Anhídrido fosfórico (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b> soluble en agua y	8,0 %
Citrato Soluble en agua	5,6 %
<b>Oxido de potasio (K<sub>2</sub>O)</b> soluble en agua	12,0 %
<b>Oxido de magnesio (MgO)</b> Soluble en agua	2,0 %
	1,4 %
<b>Azufre total (S)</b> Soluble en agua	5,0 %
	4,0 %
Microelementos	
Hierro (Fe) Soluble en agua como quelato de EDTA	0,40 %
	0,15 %
Cobre (Cu)	0,05 %
Manganeso (Mn)	0,06 %
Zinc (Zn)	0,02 %
Boro (B)	0,02 %
Molibdeno (Mo)	0,015 %
<b>Diámetro de gránulo (mm)</b>	2,5 - 3,5

## Plantación

La plantación propiamente tal, involucra posicionar la planta en la casilla, procurando que sus raíces estén perfectamente estiradas y tengan el espacio suficiente, considerando además que el cuello de la planta quedará a no más de 5 cm bajo el borde de la casilla (**Figura 4**). Luego de haber evaluado toda la situación

anterior, se aplica sobre el piso de la casilla que contiene parte de la tierra mullida de la casilla completa, 15 gramos de fertilizante de lenta entrega tipo Basacote 9 meses. Simultáneamente, teniendo la planta en suspensión se agrega la tierra mullida procurando cubrir todas las raíces y compactando con la pala la tierra mullida, de modo de evitar que las raíces queden en contacto con aire en el interior y asegurando con ello que la planta quede bien posicionada y firme dentro de la casilla. Posteriormente, se agrega toda la tierra restante que fue extraída de la casilla y con los pies se compacta hacia abajo procurando que el cuello de la planta quede a la vista.



**Figura 4.** Etapas de plantación, una vez realizada la casilla se aplica el fertilizante (opcionalmente gel higroscópico) y se establece dependiendo de la temporada (mayo-junio o septiembre-octubre).



**Figura 5.** Preparación de gel higroscópico previo al tratamiento de las plantas.

En el caso de la plantación tardía, posterior a la época invernal, las plantas deberán ser previamente sumergidas en el agua del balde ya incorporado el gel higroscópico, calculando que la dosis por planta es de 2 g por planta. En 15 a 20 litros de agua se aplica el gel que permita que la mezcla quede gelatinosa pero fluida (se estiman 2 puñados de gel para ese volumen) (Figura 5). Esta labor se puede efectuar en el vivero antes del transporte a terreno, convirtiéndose en un método seguro para transportar las plantas sin riesgo de que se resequen. El sistema mantiene las plantas al menos 24 horas con una turgencia normal manteniéndose el gel, en solución con el agua, no siendo necesario aplicar nuevamente en el sitio de plantación. La preparación del gel y su aplicación es una actividad que se realiza en terreno.

Se debe considerar que las raíces de las plantas deben ser bañadas cuidadosamente de modo de envolver las raíces, pero no eliminando o lavando el sustrato en el cual vienen desde el vivero (Figuras 6 y 7).



**Figura 6.** Preparación de las plantas para la aplicación de gel en vivero. Se ingresan las plantas con todo su sustrato en bolsas plasticas con perforaciones para el ingreso de la solución de gel.



**Figura 7.** Una vez que las plantas fueron sumergidas 10 a 15 segundos en la solución, se ingresan a una caja donde serán transportadas hacia el terreno de plantación.

En el caso de que la aplicación de gel no se haga en vivero, previo al transporte, puede ser realizada en el terreno mismo, al momento de la plantación. Para este efecto se debe mantener las plantas al menos 20 minutos en los baldes con la preparación de gel y distribuir los baldes cerca de las líneas de plantación (**Figura 8**). Debe considerarse también disponer de un número adecuado de baldes preparados con gel, de acuerdo a la velocidad de avance de la plantación y al número total de plantas a establecer.

Las fases posteriores de la plantación realizada en la temporada tardía, son las mismas que se efectúan en las plantaciones realizadas en forma previa a la temporada nivosas.



**Figura 8.** Plantas en balde con gel, cercano a la línea de plantación.

### Protección de las Plantas

La protección general de la plantación involucra la instalación de un cerco de al menos 3 hebras de alambre de púas, sostenidas en polines resistentes a la humedad, que puedan permanecer al menos 5 años. Este tipo de protección es fundamental si en el lugar se reporta ganado mayor (vacunos, ovejas o eventualmente caprinos).

Adicionalmente, se utiliza protección individual a las plantas, idealmente confeccionada artesanalmente con malla raschell, sustentada alrededor de las plantas con tutores de madera o cañería de PVC (**Figura 9**). Estos protectores cumplen varias funciones, entre ellas: protegen a las plantas del corte efectuado por conejos, liebres o roedores; evitan el exceso de radiación en la edad temprana de la planta (hasta 3 años); impiden el desarrollo de malezas en torno al cuello de la planta, impidiendo que estas les resten crecimiento al competir con ellas por el agua y los nutrientes del suelo; generan un microclima que amortigua las condiciones extremas de frío o calor sobre la planta, evitando con ello un estrés prematuro que las debilite.

Alternativamente, se pueden utilizar *shelters* disponibles en el mercado (**Figura 10**) que cumplen similares funciones que los protectores de malla raschell. Estos *shelters* comerciales son más difíciles de fijar firmemente al suelo, por lo que el viento puede desprenderlos. Por lo mismo resulta aconsejable efectuarles algunas perforaciones (4) de modo de reducir su resistencia al viento y al mismo tiempo mejorar la ventilación en su interior, por cuanto durante la temporada estival tienden a concentrar el calor en mayor proporción que los protectores de malla raschell, situación que puede resultar perjudicial para las plantas.



Figura 9. Instalación de protecciones en plantas usando malla rashell.

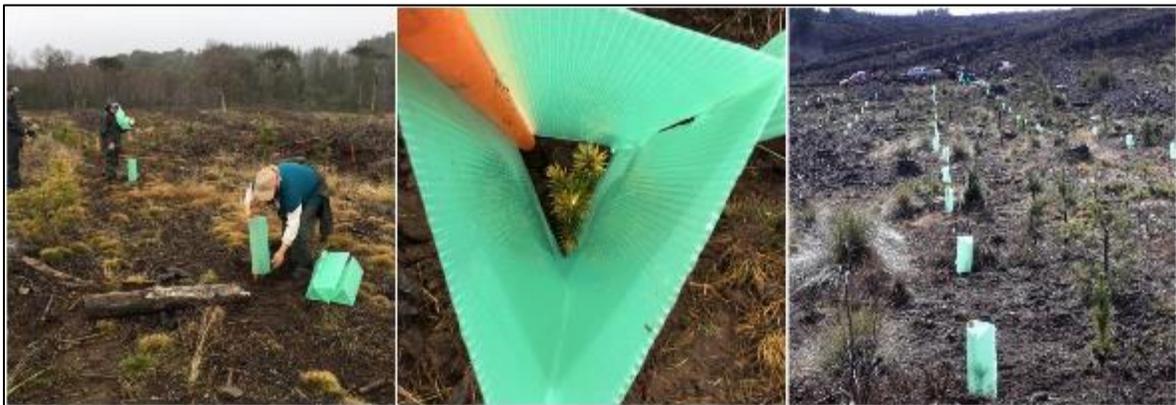


Figura 10. Instalación de protecciones en plantas utilizando shelters

### Mantenimiento de Plantas

Una vez realizada la plantación, araucaria es una especie que en general no requiere mayor mantención, si fue establecida en la época adecuada. Se espera que la protección individual no sea necesaria más allá de los 5 años, ocasión en que debería ser retirada. Si se detecta clorosis (más de un tercio de la planta con hojas amarillas) es probable que la planta esté afectada por el exceso de sombra que le brinda la protección individual. En este caso, una vez retirada la protección la planta debería tornar sus hojas al verde normal de la especie.

### REFERENCIAS

Álvarez, V., Poblete, P., Soto, D., Gysling, J., Kahler, C. et al. (2022). Anuario Forestal 2022. Boletín Estadístico N° 187. Instituto Forestal, Chile. 273 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32501>

**Balocchi, F., Wingfield, M., 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 Pathology*, 70(5): 1243-1259. <https://doi.org/10.1111/ppa.13353>

**Hechenleitner, P., Gardner, M., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P. & Martínez, C. (2005).** *Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación. Primera Edición.* Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188 p.



**Volumen 30 N° 1. Abril, 2024**

# **CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL**



**[www.infor.cl](http://www.infor.cl)**  
**<https://revista.infor.cl>**