



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Análisis costo-efectivo de la aplicación de bioestimulante radicular y dos técnicas de manejo sobre la supervivencia y crecimiento de plántulas de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus dombeyi* en Caricuicui, Panguipulli.

Patrocinante: Sra. Milen Duarte
Co-patrocinante: Sr. Diego Parra

Trabajo de Tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniera en Conservación de Recursos Naturales

NATALIA BELÉN PARRA PEÑA
VALDIVIA

2025

i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	AGRADECIMIENTOS	ii
iii	RESUMEN	iii
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Restauración Ecológica	1
1.2	Especies más usadas en la restauración ecológica	2
1.3	Uso de microorganismos	3
1.4	<i>Bacillus y Trichoderma</i>	4
1.5	<i>Bacillus y Trichoderma</i> en la agricultura	5
1.6	Técnicas de manejo convencionales	6
1.7	Indicadores de desempeño	7
1.8	Limitaciones y aplicaciones del estudio	8
1.9	Objetivos	8
1.9.1	Objetivo general	9
1.9.2	Objetivos específicos	9
2	MÉTODOS	9
2.1	Área de estudio	9
2.2	Diseño del estudio	13
2.3	Toma de datos	14
2.4	Análisis estadístico	15
3	RESULTADOS	18
3.1	Supervivencia	19
3.2	Tasas de crecimiento en largo	21
3.3	Tasas de crecimiento en diámetro a la altura del cuello	22
3.4	Número de hojas	24
3.5	Área foliar específica	26
3.6	Análisis de costo-efectividad	27
4	DISCUSIÓN	29
5	CONCLUSIÓN	38
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
Anexos	1 Diseño espacial del ensayo experimental	45
	2 Aplicación de malla raschel alrededor de la planta, correspondiente al tratamiento 3	46
	3 Puntos de muestreo análisis de suelo	47
	4 Fotografías de la plantación en el área de estudio	48
	5 Estero Mañedehue	49
	6 Resumen general de los resultados	49

Calificación del Comité de Titulación

		Nota
Patrocinante:	Sra. Milen Duarte.	6,5
Co-Patrocinante	Sr. Diego Parra.	6,8
Informante:	Sr. Cristian Montalva.	6,2
Informante:	Sr. Felipe Zúñiga.	6,2

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



Sra. Milen Duarte

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Milen Duarte y Diego Parra, mis patrocinantes y guías, por su apoyo constante, su disposición, paciencia y valiosas sugerencias, que enriquecieron cada etapa de este trabajo y me permitieron consolidar mis conocimientos en restauración ecológica.

A CONAF, por haber sido la institución que impulsó este estudio, brindándome la oportunidad de llevar a cabo esta investigación como tesista. Agradezco profundamente la confianza depositada en mí y el financiamiento que permitió la ejecución de este proyecto.

A INFOR, por su colaboración en las actividades de terreno, especialmente en la toma de datos, caracterización del suelo y apoyo logístico durante el trabajo en campo, lo que fue fundamental para la obtención de información y desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a todo el equipo del Laboratorio de Restauración Socioecológica y al Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB), por proporcionarme los recursos y la infraestructura necesarios para llevar a cabo este estudio.

A mis padres, ya que sin su amor y apoyo constante no habría sido posible llegar hasta aquí.

RESUMEN

La restauración ecológica ha adquirido una creciente importancia debido al deterioro de ecosistemas clave por la actividad antrópica. En este contexto, uno de los principales desafíos de los programas de restauración impulsados por CONAF ha sido mejorar las tasas de establecimiento de las plantas en zonas desprovistas de vegetación. Se evaluó el efecto de bioestimulantes radiculares nativos de uso comercial (*Trichoderma spp.* y *Bacillus spp.*) y dos técnicas de manejo tradicional (casilla y protección con malla raschel) sobre la supervivencia y desarrollo inicial de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua*, bajo condiciones de campo, con el objetivo de identificar estrategias costo-efectivas que permitan guiar decisiones en la implementación de programas de restauración ecológica. El ensayo experimental se implementó en un sitio ubicado en Caricuicui, Panguipulli, Región de Los Ríos, utilizando un diseño aleatorizado con 576 individuos distribuidos en 36 parcelas. Se midieron variables morfológicas y funcionales, tales como supervivencia, largo, DAC, número de hojas, área foliar específica y rebrote, en un periodo de evaluación de siete meses. Dado que los datos no presentaron distribución normal, se aplicaron pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis, test de Dunn y Modelo lineal Generalizado Mixto). En cuanto a los tratamientos, la malla raschel generó el mayor efecto en supervivencia y crecimiento en altura, mientras que el bioestimulante se asoció a mayor rebrote y número de hojas en roble. La técnica de casilla obtuvo resultados intermedios, pero destacó como la opción más costo-efectiva. Las respuestas fueron moduladas tanto por la autoecología de cada especie como por las condiciones del sitio y los tratamientos aplicados. Los hallazgos entregan evidencia empírica útil para orientar decisiones en restauración ecológica y sugieren la necesidad de ampliar este tipo de ensayos a largo plazo y en distintos contextos ecológicos.

Palabras clave: Restauración ecológica, costo-efectividad, plántulas, microorganismos.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la actividad humana ha degradado y reemplazado los ecosistemas naturales a través de diversas perturbaciones, afectando funciones cruciales como la regulación hídrica, el ciclo de nutrientes, la producción de biomasa, la conservación del suelo y la biodiversidad (Smith-Ramírez *et al.* 2013). Esto ha impulsado el desarrollo de estrategias de restauración ecológica en distintas regiones del mundo, incluyendo el centro sur del país, donde la alta presión sobre los ecosistemas, la necesidad de recuperar servicios ecosistémicos fundamentales para la comunidad y el alto grado de biodiversidad y endemismo, han convertido a estas zonas como prioritarias para la restauración (MMA 2021).

En este contexto, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) ha implementado variados programas de restauración de bosques nativos, sin embargo uno de los principales desafíos ha sido lograr tasas de supervivencia satisfactorias de las plantaciones en sitios a restaurar, por lo que este estudio se enmarca dentro de un ensayo experimental implementado por CONAF en el sector de Caricuicui, comuna de Panguipulli, Región de los Ríos, con el objetivo de evaluar los efectos de distintas estrategias de establecimiento, incluyendo la aplicación de bioestimulantes radiculares nativos comerciales y técnicas de manejo tradicional como la casilla y la protección con malla raschel, y así identificar opciones costo efectivas que puedan mejorar el desempeño inicial en plántulas de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus dombeyi* bajo condiciones reales de terreno.

1.1 Restauración Ecológica

Debido a las crecientes perturbaciones, muchos paisajes no pueden recuperarse por sí solos o lo hacen muy lentamente, por lo que es imprescindible implementar medidas que aceleren la recuperación de los ecosistemas nativos degradados o destruidos. La restauración ecológica se ha convertido en una solución cada vez más relevante y relativamente rentable para mitigar los efectos del cambio climático y recuperar la capacidad de los bosques de proveer bienes y servicios a la sociedad (Azpilicueta *et al.* 2011).

La restauración ecológica se define como una actividad intencional que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema en términos de salud, integridad y sustentabilidad. Según la Society for Ecological Restoration (SER 2004) aquellos ecosistemas que requieren restauración son los que han sido

degradados, dañados, transformados o completamente destruidos debido a actividades humanas directas o indirectas. El objetivo principal de la restauración ecológica es mejorar el estado de conservación de los ecosistemas, recuperar su productividad en áreas degradadas y aumentar el flujo de bienes y servicios ecosistémicos para el bienestar de las personas y la sociedad. En este sentido, la restauración no busca necesariamente replicar un estado pasado idealizado, sino que restituir un ecosistema autosustentable que evolucione y se adapte en el tiempo (Gann *et al.* 2019).

1.2 Especies más usadas en la restauración ecológica

Entre las especies arbóreas más utilizadas para restaurar ecosistemas boscosos en el centro sur de Chile por parte de CONAF destacan el *Nothofagus dombeyi* (coigüe) y *Nothofagus obliqua* (roble), debido a su amplia distribución natural, su rol estructural en los ecosistemas boscosos y su adaptabilidad a diversas condiciones ambientales. *N. dombeyi* es una especie siempreverde endémica de los bosques subantárticos de Chile y Argentina que se extiende desde el nivel del mar hasta zonas altoandinas (Donoso *et al.* 2006). Prefiere suelos húmedos y puede desarrollarse desde el nivel del mar hasta casi el límite superior de la vegetación arbórea, incluso en áreas con drenaje restringido llamadas ñadis (Gerding *et al.* 2014; Donoso *et al.* 1999). *N. dombeyi* es una especie de gran plasticidad, capaz de adaptarse a diversas condiciones ambientales y suelos volcánicos en el sur (Donoso *et al.* 1999). Según Donoso *et al.* (1999) la característica más relevante del coigüe es ser una especie sombra intolerante, alcanzando su mayor desarrollo en condiciones de mayor luminosidad.

Por su parte *N. obliqua*, especie caducifolia, muestra una alta capacidad de crecimiento en sitios abiertos y de alta luminosidad, con preferencia de suelos profundos, fértiles y con alta capacidad hídrica, teniendo un característico manto de materia orgánica en descomposición (Loewe-Muñoz *et al.* 1998; Reyes *et al.* 2014). Ambas especies presentan atributos funcionales valiosos, como la tolerancia a la sequía y su capacidad de establecimiento en condiciones adversas, lo que ha motivado su selección en numerosos proyectos de restauración implementados por CONAF y otras instituciones públicas (Müller-Using *et al.* 2014). El uso de estas especies permite no solo reconstituir la cobertura arbórea, sino también restaurar funciones ecosistémicas fundamentales como la regulación hídrica, el reciclaje de nutrientes y la provisión de hábitat para otras especies.

Diversos estudios han respaldado esta elección en base a su comportamiento regenerativo y tolerancia ambiental. Grosse (1988) observó que el roble presenta mejores respuestas de crecimiento y

sobrevivencia bajo condiciones de alta luminosidad en comparación con situaciones de sombra, confirmando su estrategia como especie pionera en ambientes abiertos. Respecto al coigüe, Piper *et al.* (2007) identificaron una mayor tolerancia a la sequía en comparación con *N. nitida*, reflejada en un mejor desempeño fotosintético y doble tasa de supervivencia bajo condiciones de estrés hídrico, lo cual se condice con su amplia distribución y exposición a gradientes hídricos extremos. Además, Reyes-Díaz *et al.* (2005) demostraron que *N. dombeyi* posee una mayor resistencia al congelamiento en estado de plántula, al mantener un aparato fotosintético funcional a bajas temperaturas y acumular sustancias crioprotectoras, lo que es consistente con su éxito altitudinal y latitudinal. Estos antecedentes respaldan la preferencia del uso de coigüe y roble en contextos de restauración ecológica, especialmente en sitios con condiciones de alta exposición, sequía estacional o temperaturas extremas.

1.3 Uso de microorganismos

En el contexto de la restauración ecológica, el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM) se ha planteado como una alternativa innovadora para mejorar el desempeño inicial de plántulas en sitios degradados, donde el establecimiento de especies nativas se vuelve un desafío. La incorporación de estos insumos biológicos, compuestos generalmente por combinaciones de microorganismos benéficos como bacterias del género *Bacillus* y hongos del género *Trichoderma*, han demostrado un efecto significativo en la promoción del crecimiento vegetal a través de mecanismos directos e indirectos, como la estimulación del sistema radicular, la mejora en la absorción de nutrientes, la inducción de tolerancia al estrés abiótico y el control de patógenos mediante antibiosis o competencia (Harman *et al.* 2004; González-León 2022).

En Chile, donde gran parte de los esfuerzos de restauración ecológica se desarrollan en suelos degradados o de baja fertilidad, el uso de bioestimulantes surgen como una herramienta estratégica para favorecer la supervivencia y el crecimiento inicial de especies nativas (MMA 2018). No obstante, es importante reconocer que gran parte de la evidencia disponible proviene de estudios en condiciones controladas como macetas o invernaderos, lo cual no siempre resulta extrapolable a escenarios de campo, donde los factores climáticos, edáficos y bióticos generan mayor variabilidad en las respuestas. Esta diferencia puede explicar la baja tasa de efectividad que se observa en ciertos casos al trasladar resultados de laboratorio a ensayo de restauración operativa (Azarbad & Junker 2024; Chanway *et al.* 2000).

El uso de microorganismos ha sido ampliamente estudiado y aplicado en la agricultura, contribuyendo significativamente a la producción de alimentos y reducir pérdidas económicas (Reis *et al.* 2024). No obstante, su aplicación en especies arbóreas nativas en contextos de restauración es aún incipiente y carece de suficiente evidencia empírica en campo. Estudios recientes muestran resultados alentadores en inoculaciones de especies leñosas con fines de restauración, pero advierten que los efectos son altamente dependientes del sitio, del manejo y de la interacción con comunidades microbianas del suelo (Santacruz-García *et al.* 2022; Cinantya *et al.* 2023).

En la última década se ha comenzado a explorar de manera más directa la aplicación de microorganismos en contextos forestales y de restauración. Estudios recientes han documentado que la inoculación con *Trichoderma* y *Bacillus* puede mejorar la supervivencia y crecimiento de especies leñosas bajo condiciones de estrés, aunque sus resultados son aún más heterogéneos y dependientes de sitio (Ahmed *et al.* 2024). Esta nueva evidencia refuerza la necesidad de ensayos en terreno que permitan validar la efectividad de los bioinsumos en especies nativas de importancia ecológica, como lo es *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus dombeyi* en el sur de Chile, contribuyendo a reducir la brecha entre estudios experimentales y aplicaciones operativas en restauración.

1.4 *Bacillus* y *Trichoderma*

La bacteria *Bacillus subtilis* y los hongos del género *Trichoderma*, han sido considerados de los microorganismos más relevantes en la agricultura, debido a su efectividad como promotores del desarrollo e inductores de resistencia a diversos tipos de estrés biótico y abiótico en las plantas, así también como control de enfermedades que merman la producción agrícola (González-León 2022).

B. subtilis es una procariota ampliamente distribuida en la naturaleza, creciendo en un extenso intervalo de pH entre los 4,9 a 9,3 y a temperaturas de 10 a 48°C. Su utilización ayuda en la nutrición vegetal a través de la fijación biológica del nitrógeno y la solubilización de los fosfatos, además de potenciar el crecimiento por la acción de las fitohormonas que esta bacteria produce. También es reconocido por ser un importante agente de biocontrol (González-León 2022).

Bien se sabe que las plantas también poseen sus mecanismos de defensa ante el ataque de fitopatógenos, lo que se conoce como Respuesta Sistemática Inducible (RSI) la cual es activada por elementos conocidos como elicitores, que pueden ser moléculas o componentes de los agentes causantes de la enfermedad, además de ciertas rizobacterias (Glick 2020). Sin embargo, distintas cepas de *B.*

subtilis han demostrado su capacidad de desencadenar la RSI, y así disminuir los daños foliares en las plantas. Esto porque la bacteria activa la expresión de un RNA no codificante largo asociado estrechamente con la activación de las vías de defensa (González-León 2022).

Las especies del género *Trichoderma* poseen capacidades endosimbióticas avanzadas, que les permite sustentar a las plantas hospedantes, adaptarse competitivamente a ambientes microbianos y colonizar una amplia gama de ecosistemas del suelo (Harman *et al.* 2004).

Se ha evidenciado que las especies de este hongo mejoran el crecimiento de las plantas favoreciendo el desarrollo radicular, la captación de nutrientes y la resistencia al estrés abiótico. Esto se debe principalmente a su aptitud para producir fitohormonas conocidas como auxinas y citoquininas, además de provocar solubilidad y, por ende, aumentar la disponibilidad de nutrientes y micronutrientes, entre ellos los fosfatos, el hierro, el manganeso y el magnesio. También aumenta el verdor de las plantas por la formación de sustancias como el ácido indol acético, el ácido antranílico y el ácido giberélico lo que da lugar a mayores tasas en la fotosíntesis (González-León 2022).

Trichoderma es muy conocido además por su potencial en el control biológico de las enfermedades en plantas, teniendo diversos mecanismos, entre los que destaca su habilidad para inducir la RSI (González-León 2022). En este proceso, libera diversas sustancias en la rizosfera, incluidas proteínas con actividad enzimática y productos de genes de virulencia que activan los mecanismos de defensa de las plantas (Kashyap *et al.* 2017; Sood *et al.* 2020). También inhibe el desarrollo de fitopatógenos al producir sideróforos que evitan el acceso al hierro (Sood *et al.* 2020).

Estudios han afirmado que la co-inoculación de *B. subtilis* y *T. harzianum* puede mejorar el crecimiento de las plantas, aumentando la biomasa aérea y radicular, y promover las interacciones planta-organismo, a través de grupos microbianos asociados a las raíces, como las Rhizobiaceae. Sin embargo, las investigaciones también han revelado que estas especies pueden competir por recursos como el carbono y hierro en la rizosfera, lo que podría limitar su eficacia conjunta en ciertas situaciones (Rigobelo *et al.* 2024).

1.5 *Bacillus* y *Trichoderma* en la agricultura

Como se menciona anteriormente, se ha estudiado ampliamente los efectos de estos microorganismos en el área agrícola, uno de ellos consistió en poner a prueba la eficacia de Centeon Max, bioestimulante vegetal compuesto por *Trichoderma virens* y *Bacillus subtilis*, a distintas

concentraciones como bioestimulante radicular en cultivos de arándanos, dando como resultado un incremento en las raíces y en el peso promedio de las raíces de las plantas sometidas al producto, siendo el tratamiento Centeon Max a 1 kg/ha el que obtuvo los mejores rendimientos (Donoso 2021).

También se ha evaluado el déficit hídrico como impulsor de la relación mutualista entre *Trichoderma harzianum* y dos genotipos de trigo, lo que dio como resultado una importante relación entre el hongo y condiciones de sequía, pues *T. harzianum* mostró efectos positivos en cuanto a volumen radicular solo en plantas sometidas a escasez hídrica, además de estimular significativamente la producción de semillas en ambos genotipos de trigo estudiados (Donoso *et al.* 2008).

T. harzianum se probó en plántulas de *Pinus radiata* en conjunto con los efectos del compost. Gracias al estudio se pudo concluir que este último afectó a las variables de altura y biomasa aérea, sin embargo, no tuvo influencia sobre el desarrollo de raíces, a diferencia de *T. harzianum*, que solo generó efecto significativo en el área radicular, y el tratamiento que presentó los mejores resultados fue la combinación del hongo y compost, con plántulas de pino de mayor altura, biomasa total y aérea (Donoso *et al.* 2008).

En México se evaluó la respuesta del chile dulce (*Capsicum annuum*) tras la aplicación de *B. subtilis* y lombricomposta en invernadero, debido a la necesidad de un producto que no solo mejore la productividad agrícola, sino que también constituya una alternativa segura y sostenible en comparación a la aplicación de fertilizantes sintéticos convencionales. El experimento evidenció el aumento en la producción de frutos de chile en un 364% en las plantas inoculadas con la bacteria, además se constató que el aumento de lombricomposta permitió que las poblaciones de *B. subtilis* se incrementaran en las raíces del chile dulce (Lara *et al.* 2020).

1.6 Técnicas de manejo convencionales

En la silvicultura tradicional y posteriormente en la restauración ecológica, se han utilizado ampliamente técnicas como la casilla y la protección con malla raschel para favorecer el establecimiento y la supervivencia de las plántulas. La técnica de la casilla consiste en la preparación manual del suelo mediante la excavación de agujeros de 40 x 40 cm aproximadamente, utilizando palas plantadoras u otras herramientas, para así mejorar las condiciones físicas del suelo, facilitando el desarrollo radicular de las plantas. Al remover el suelo en el área de plantación, se incrementa la porosidad y la capacidad

de infiltración de agua, lo que favorece la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes (Sotomayor *et al.* 2001).

Por su parte, la protección de malla raschel se instala alrededor de la plántula, para protegerlas de factores ambientales adversos como la radiación solar, el viento y las temperaturas extremas. Esta malla actúa como una barrera física que modula el microclima alrededor de la planta, reduciendo el estrés térmico y la pérdida de humedad, lo que puede promover una mayor tasa de supervivencia y un crecimiento más vigoroso en las etapas iniciales de establecimiento (González & Donoso 2019).

1.7 Indicadores de desempeño

La supervivencia es el indicador clave para evaluar el éxito en cualquier acción que conlleve el establecimiento de plantas, especialmente en contextos de restauración ecológica. Una alta supervivencia sugiere que las condiciones del sitio y los tratamientos usados son favorables para las especies plantadas. Además, refleja la capacidad de las plantas para tolerar factores de estrés como sequía, competencia y herbivoría (Padilla & Pugnaire 2007; CONAF 2017).

El largo de las plantas es una variable morfológica ampliamente utilizada para evaluar el crecimiento aéreo durante las primeras etapas del establecimiento. En restauración ecológica, la altura se interpreta como un indicador de vigor inicial, pues expresa la capacidad de las plántulas de captar luz, crecer en ambientes competitivos y generar biomasa aérea. No obstante, un aumento en la elongación del tallo no siempre conlleva un mejor desempeño ecológico, ya que puede significar estructuras más débiles, poco lignificadas y susceptibles a quiebres o desecación, más aún en condiciones de estrés ambiental (Cortina *et al.* 2006).

En complemento, el diámetro a la altura del cuello (DAC) representa un indicador de la robustez estructural y resistencia mecánica, permitiendo estimar la capacidad de anclaje de la planta, su reserva de biomasa basal y su tolerancia frente a perturbaciones como viento o herbivoría. Un mayor DAC suele asociarse con un sistema radicular más desarrollado y una mayor estabilidad general de la plántula (Cortina *et al.* 2006).

Un mayor número de hojas puede indicar una mayor capacidad fotosintética, mientras que la presencia de brotes nuevos refleja la actividad meristemática y el potencial de crecimiento futuro. Estas variables pueden ser indicativas de la salud general de la planta y su capacidad para adaptarse y prosperar en el entorno restaurado (Kleiman & Aarssen 2007).

El Área foliar específica (SLA, por sus siglas en inglés Specific Leaf Area) es un rasgo funcional que expresa la relación entre el área de la hoja y su masa seca (cm^2/g) y es ampliamente usado en ecología vegetal como indicador de estrategias adaptativas de las plantas frente a distintas condiciones ambientales. Un SLA alto está asociado con hojas delgadas, con menor inversión estructural, atribuible a una estrategia de crecimiento rápido. Por el contrario, un SLA bajo indica hojas más densas y una estrategia conservadora, adaptada a ambientes con limitaciones de recursos (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013).

1.8 Limitaciones y aplicaciones del estudio

Se proyecta continuar con el seguimiento de este ensayo experimental a largo plazo, por ello, el presente estudio trata de una investigación acotada, que entrega resultados preliminares y establece una línea base del proyecto. El corto periodo de evaluación constituye una de las principales limitaciones, ya que no permite observar el desempeño futuro de las plántulas ni los posibles efectos que podrían manifestarse con el tiempo bajo los tratamientos aplicados. Además, las mediciones se concentran en variables morfológicas y funcionales iniciales, lo que impide establecer relaciones directas con indicadores de éxito ecológicos más amplios, como la integración de las especies en la comunidad vegetal o la recuperación funcional del ecosistema. No obstante, los resultados obtenidos tienen aplicaciones prácticas relevantes para programas operativos de restauración ecológica liderados por CONAF. La evidencia obtenida permite orientar decisiones sobre el uso de bioestimulantes y técnicas silviculturales en plantaciones de roble y coigüe, aportando criterios técnicos que puedan mejorar la costo-efectividad de futuras intervenciones en sitios desprovistos de vegetación del sur de Chile. Asimismo, el enfoque experimental del estudio puede ser replicado en otras especies y condiciones, contribuyendo al desarrollo de protocolos adaptativos de restauración.

1.9 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es entregar evidencia aplicada que permita orientar decisiones técnicas para las plantaciones dentro del contexto de restauración operativa de CONAF. Si bien los tratamientos analizados responden a enfoques distintos, su inclusión en este ensayo responde al interés

práctico de explorar alternativas disponibles y usadas tradicionalmente, para optimizar la inversión en plantaciones y mejorar las tasas de establecimiento en sitios degradados o desprovistos de vegetación. Además, considerando la escasa evidencia existente respecto a la respuesta de especies arbóreas nativas a la aplicación de bioestimulantes radiculares en contextos de restauración, este estudio aporta datos empíricos de los efectos de estos tratamientos en variables clave como la supervivencia, el crecimiento y la actividad foliar de plántulas de *N. obliqua* y *N. dombeyi*.

Considerando los antecedentes expuestos, se plantean los siguientes objetivos para guiar el presente trabajo.

1.9.1 Objetivo General

Evaluar la costo-efectividad de los tratamientos aplicados sobre la supervivencia y crecimiento inicial de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua*.

1.9.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de la aplicación de los tratamientos sobre la supervivencia y desarrollo inicial de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua*.
2. Evaluar la costo-efectividad de los tratamientos considerando la supervivencia y crecimiento inicial de las plántulas en relación con los recursos destinados.

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el sector de Caricuicui ubicado en la comuna de Panguipulli, región de los Ríos, en una parcela de aproximadamente 9000 m² de extensión (figura 1). Según la clasificación climática de Koppen-Geiger, Panguipulli presenta un clima templado lluvioso con sequedad estival, clima mediterráneo de lluvia invernal de altura en los sectores cordilleranos (Sarricolea *et al.* 2017). La

comuna presenta una temperatura media anual de 11,5°C, cuyos meses más cálidos se condicen con la estación estival, con promedios que oscilan entre 13° y 16°, mientras que en el invierno las temperaturas medias son de 7°C. la precipitación media anual puede superar los 2000 mm concentrándose entre los meses de mayo y agosto (Hernández 2018).

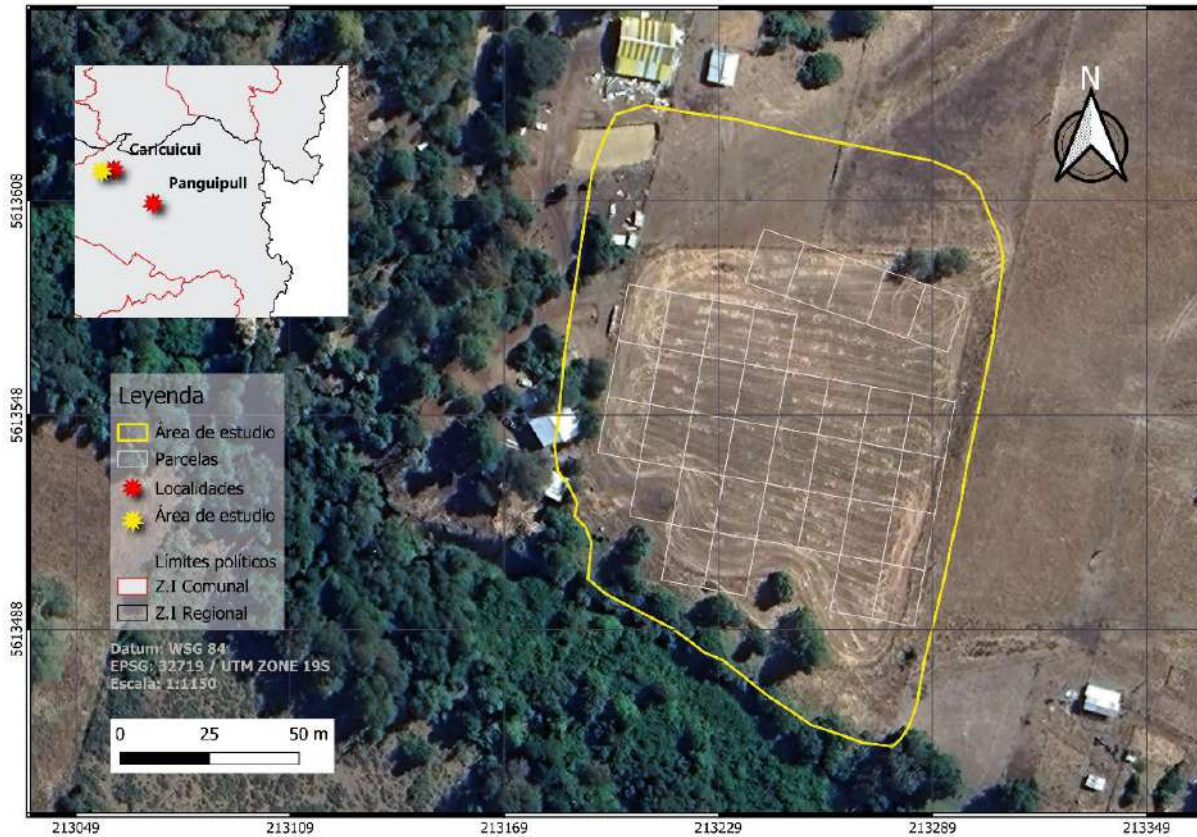


Figura 1. Composición cartográfica correspondiente al área de estudio. Elaboración propia.

En la comuna de Panguipulli, la formación vegetal principal corresponde a bosque, cubriendo cerca del 86,8% de la superficie comunal. Dentro de esta categoría destacan el bosque caducifolio, en el que predominan *Nothofagus pumilio* (Lenga) y *Nothofagus alpina* (Raulí), el bosque laurifolio compuesto por *Nothofagus dombeyi* y *Eucryphia cordifolia* (Ulmo), además del bosque siempreverde y Bosque resinoso, siendo la especie principal la *Araucaria araucana* (*Araucaria*) (Hernández 2018).

Como ecosistema de referencia para el sitio de estudio se reconoce el tipo forestal roble-raulí-coigüe (roraco) de estructura estratificada y alta heterogeneidad florística, presentes desde los 37° 30' principalmente en la cordillera de los Andes y en forma más limitada en la cordillera de la Costa, entre los 500 y los 1.000 metros de altitud. Se desarrolla en general sobre suelos de origen volcánicos trumaos, los cuales tienen textura franca y buen drenaje (Donoso *et al.* 2014). En el gradiente más

húmedo valdiviano, el roraco transiciona y co-ocurre con el Siempreverde (laurifolio templado), donde son frecuentes especies como olivillo (*Aextoxicon punctatum*), ulmo (*Eucryphia cordifolia*), tepa (*Laureliopsis philippiana*) y tiaca (*Caldcluvia paniculata*), con sotobosque denso de *Chusquea* y abundantes epífitas, lo que genera un mosaico caducifolio-siempreverde característico de Panguipulli (Luebert & Pliscoff 2017).

En cuanto a la geomorfología, la comuna presenta un notable predominio de cerros y volcanes andinos, con alturas de hasta 2.840 metros, destacando el Volcán Villarrica y el Volcán Mocho Choshuenco. El periodo Cuaternario define gran parte del paisaje que actualmente se observa, caracterizado por una intensa actividad volcánica en la cordillera de los Andes, y por diversos periodos de glaciación que originaron diversas formas constituidas por depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y glacialacustres que ocupan sectores del sistema lacustre comunal, formado por lagos de origen glacial y volcánico en la comuna (Municipalidad de Panguipulli 2013).

De acuerdo con la cartografía agrológica del CIREN (2003), el suelo presente en el área de estudio corresponde a la serie HUELLAHUE (HLL), clasificada como un miembro de la familia media, mélica de los Acrudoxic Hapludands (Andisoles). Es un suelo profundo, de origen sedimentario derivados de materiales volcánicos, ubicados en la Depresión Intermedia a una altitud entre los 120 y 150 m s. n. m.

Presentan una textura superficial franco limosa y un color pardo muy oscuro (10YR 2/2) en condición húmeda, que pasa a textura arcillo limosa y color pardo (7,5YR 4/4) en profundidad. El perfil está bien estructurado hasta los 120 cm, con estructura de bloques subangulares finos a gruesos y consistencia friable a firme, mostrando buena agregación y alta porosidad.

El drenaje es imperfecto, asociado a una topografía casi plana con pendientes de 1 a 3%, lo que favorece la retención de humedad en periodos prolongados. El horizonte Ap es de textura franco limosa, friable, con abundantes raíces finas y muy finas; el horizonte B1 presenta textura franca arcillo limosa, y los horizontes Bw1 y Bw2 muestran incremento en el contenido de arcillas (hasta franco arcillo limosa), con algunas oxidaciones de color rojo amarillento (5YR 5/6).

El pH en agua varía entre 5,6 y 6,1, lo que indica una acidez moderada a ligeramente ácida, condición típica de los Andisoles del sur de Chile. La materia orgánica es alta en el horizonte superficial (4,6-4,7% de carbono orgánico), disminuyendo en profundidad, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es elevada (26-41(+)/kg), reflejando la presencia de minerales de baja cristalinidad. Asimismo, se registra una alta retención de fósforo (90-100%), rasgo característico de los Andisoles acrúdicos.

Esta serie presenta dos variaciones, con capacidad de uso de IIIw2 y IIw2, categoría de riego de 2w y aptitud agrícola de 3 y 2.

De manera complementaria, el Instituto Nacional Forestal (INFOR) de la Región de los Ríos, realizó una caracterización general y simplificada del suelo, siguiendo sus protocolos internos de muestreo y análisis. Este tipo de evaluación, empleada rutinariamente por INFOR en estudios de terreno, proporciona una visión básica pero útil de las condiciones edáficas del área de estudio, identificando aspectos como textura, estructura y profundidad aproximada del perfil de suelo.

Para ello, se evaluaron cinco puntos de muestreo distribuidos dentro del área de estudio (anexo 3) el día 25 de marzo de 2025. La caracterización se realizó mediante métodos de inspección directa y estimaciones semi cuantitativas. Para determinar la profundidad efectiva se utilizó barreno manual, mientras que la acidez del suelo se estimó utilizando tiras indicadoras de pH, las cuales permiten una lectura aproximada con un rango de error de $\pm 0,5$ unidades. Estas determinaciones en terreno permiten identificar tendencias generales en la acidez del suelo, aunque no sustituyen un análisis de laboratorio (FAO 2009). En este caso, las lecturas sugirieron una acidez moderada en todos los puntos, con valores próximos a pH 5. El color de los horizontes se determinó usando la tabla Munsell. La clase textural fue estimada de manera táctil utilizando el protocolo descrito en el Manual para el reconocimiento (Schlatter *et al.* 2003).

Todos los perfiles presentaron una profundidad efectiva mayor a los 80 cm, salvo P4 que alcanzó los 70 cm. Los cinco puntos mostraron una estructura granular bien desarrollada con textura franco-arcillosa a lo largo de la zona evaluada. Los colores de los horizontes correspondieron a matices del sistema Munsell de 2,5 YR 3/2, 2,5 YR 3/1, 2,5 YR 2,5/1 y 2,5 YR3/3. Se observó actividad biológica, pues se registró presencia de micorrizas y raíces en toda el área, así como también fauna visible en tres de los cinco puntos. Todos los sitios se encontraban en condición de humedad y la consistencia en húmedo fue friable. No se detectó moteados ni pedregosidad superficial en ninguno de los puntos, aunque se observó presencia de grava a partir de los 70 cm de profundidad. Esta caracterización permitió interpretar con mayor precisión las condiciones edáficas reales del sitio y su potencial influencia sobre el desempeño de las plántulas.

2.2 Diseño del estudio

El ensayo experimental consistió en la delimitación del área para la posterior aplicación de ensayos. En cuanto a la delimitación se establecieron 36 parcelas de 12 x 16 metros, las que se subdividieron en 16 grillas de 3 x 4 metros, en las cuales se plantó cada individuo con su respectivo tratamiento. Las mediciones para la parcelación se llevaron a cabo con el instrumento Vertex y brújula.

Los tratamientos se exponen en la siguiente tabla (cuadro 1).

Cuadro 1. Tipo de tratamiento con su respectivo código

Código	Nombre del tratamiento
T0	Control
T1	Bioestimulante
T2	Casilla
T3	Malla

Se trabajó con un total de 576 plantas, 288 de ellas *N. dombeyi* y 288 *N. obliqua*, las cuales se obtuvieron de un vivero de Loncoche, con semillas provenientes de Panguipulli. Las plantas se encontraban a raíz desnuda y ya contaban con dos años aproximadamente.

Ambas especies se aleatorizaron espacialmente en el total de parcelas, dando como resultado 18 parcelas de cada especie. Aquello se realizó con la función de “ALEATORIO” en el programa Excel. Los tratamientos igualmente se aleatorizaron con la misma función. Resultando 72 individuos de cada tratamiento en las dos especies de estudio (anexo 1). Durante la plantación en el área de estudio se instaló malla anti-conejo a todos los individuos del ensayo para despejar lo más posible la variable de herbivoría.

Para el tratamiento T0 o control se usó la técnica de Doble T, la cual consiste en la ejecución de un corte longitudinal en el suelo con la pala plantadora, y dos cortes perpendiculares a éste (Sotomayor *et al.* 2001).

El tratamiento T1 (bioestimulante) consiste en la aplicación de un pool de estimulantes y biocontroladores. En primer lugar, se aplicó el producto BAFEX-N el cual es un nematocida biológico con acción sobre nematodos fitoparásitos compuesto por cepas nativas de los biocontroladores *Bacillus spp*, tales como *Bacillus thuringiensis* cepa Anemophila, *Bacillus cereus* cepa Bromelia y cepa Peumo.

Este primer producto se aplicó a las plántulas en vivero en forma de riego tres semanas antes de la plantación en el área de estudio, siendo la dosis 50 mL de una solución de 15 g disueltos en un litro de agua. Por otro lado, en la plantación se aplicó los productos SP-1 (1g), estimulante biológico compuesto por *Trichoderma harzianum* cepa Gomorteka, en las raíces de la planta, y por último se aplicó Centeon Max (1 g), bioestimulante biológico compuesto por *Trichoderma virens* cepa Luito y *Bacillus subtilis* cepa N5 en la superficie alrededor del individuo plantado.

El tratamiento T2 (casilla) consiste en preparar el suelo rompiendo su estructura en un área de 40 x 40 cm, ubicándose al centro la plántula (Sotomayor *et al.* 2001).

El tratamiento T3 (malla) correspondiente a la protección de malla raschel consiste en la aplicación de la malla 80%, de color negra, alrededor de la planta sostenida con 3 estacas de coligüe cubriendo el 100% de esta. (anexo 2)

2.3 Toma de datos

Se registró supervivencia, largo de la planta, DAC, N° de hojas y brotes según correspondía, en la totalidad de individuos del ensayo. Por otra parte, se registró el área foliar específica (SLA) solo en los individuos de *N. dombeyi*, esto debido que, en el primer muestreo solo las plantas de aquella especie poseían hojas, y, por el contrario, los individuos de *N. obliqua* solo brotes.

La sobrevivencia se midió mediante inspección visual directa, considerando las plantas muertas aquellas que no presentaban hojas, brotes ni yemas activas visibles, es decir, sin signos evidentes de actividad vegetativa. Los datos fueron registrados en una planilla mediante codificación binaria (1 = viva; 0 = muerta) para luego calcular el porcentaje de supervivencia por tratamiento, especie y periodo evaluado.

El largo de la planta fue registrado como una medida del crecimiento aéreo de cada individuo, y se diferenció de la altura convencional al considerar la longitud total del tallo principal desde la base del cuello hasta el ápice, independientemente de su orientación vertical. Aquella decisión metodológica se debe a que muchas plantas presentaban inclinaciones que hacían impreciso el uso de la altura como referencia. La medición se realizó usando huincha de medir y los valores fueron registrados en centímetros.

El diámetro a la altura del cuello, medido como indicador del desarrollo estructural de las plántulas, se llevó a cabo utilizando un pie de metro análogo, posicionando el instrumento justo en la zona de transición entre el tallo y la raíz. Los valores obtenidos fueron registrados en centímetros.

Para el N° de hojas/brotes se realizó un conteo manual de todas las hojas y brotes visibles en cada individuo, contabilizando únicamente aquellas que estuvieran activas.

El Área Foliar Específica fue medida como una variable funcional que permite evaluar la relación entre la superficie foliar y la masa seca de las hojas. Esta medición se aplicó exclusivamente a individuos de *N. dombeyi*, ya que, durante el primer periodo de evaluación, fue la única especie que presentaba hojas desarrolladas. Para ello se seleccionó una muestra de tres hojas completas por individuo, asegurando que estuvieran totalmente extendidas y endurecidas, evitando hojas con signos de ataque de herbívoros o patógenos. Aquellas hojas fueron escaneadas para calcular su superficie en centímetros cuadrados mediante el software ImageJ. Posteriormente, fueron secadas en estufa a 60° C durante tres días, hasta alcanzar peso constante, y se pesaron utilizando una balanza analítica para registrar la masa seca en gramos. El SLA fue calculado dividiendo el área foliar total por la masa seca total de la muestra ($SLA = \text{cm}^2 / \text{g}$) (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013).

Las variables fueron medidas durante tres periodos de tiempo, siendo el primero el mes de agosto del año 2024. La segunda medición se realizó el mes de noviembre del 2024, y el tercer muestreo se realizó el mes de marzo del año 2025.

2.4 Análisis estadístico

Objetivo 1. Evaluar el efecto de la aplicación de los tratamientos sobre la supervivencia y desarrollo inicial de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua*.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software R. Previo al análisis se evaluó el supuesto de normalidad para todas las variables mediante el test de Shapiro-Wilk y visualización de histogramas y curvas de densidad. Dado que la mayoría de las variables evaluadas no cumplieron con dicho supuesto, se optó por aplicar pruebas no paramétricas.

Para las variables de tasa de crecimiento en largo y DAC, tanto en coigüe como en roble, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis para determinar diferencias globales entre tratamientos. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) se aplicó un test de Dunn post hoc con ajuste de

Bonferroni para comparaciones múltiples y se asignaron letras de significancia para identificar a los grupos estadísticamente diferentes. Cabe destacar que el test Dunn se llevó a cabo exclusivamente para el último periodo evaluado en marzo 2025, por significar la estimación más representativa del efecto acumulado de los tratamientos, minimizando la influencia de fluctuaciones transitorias de los periodos intermedios.

En el caso de variables de medidas repetidas como número de hojas y SLA, se emplearon modelos lineales mixtos generalizados (GLMM). Para número de hojas, dada su distribución de conteo y presencia de sobre dispersión, se utilizó un modelo GLMM con distribución Poisson negativa y función de enlace log incluyendo como factor aleatorio el ID para considerar la repetición en los mismos individuos. Para SLA se ajustó un modelo GLMM con distribución Gamma y función de enlace log. En ambas variables, los efectos fijos correspondieron a tratamiento, periodo y su interacción.

Posteriormente, se realizaron comparaciones múltiples con ajuste de Tukey para obtener las letras de significancia que indican las diferencias entre tratamientos dentro de cada periodo evaluado. Finalmente, los resultados se graficaron mediante boxplots y gráficos de barras con sus respectivas letras de significancia sobre cada tratamiento o periodo para facilitar su interpretación.

Objetivo 2. Evaluar la costo-efectividad de los tratamientos considerando la supervivencia y crecimiento inicial de las plántulas en relación con los recursos destinados.

Para ello se calculó el precio unitario por planta por cada tratamiento evaluado (cuadro 2). En el caso de T0 los costos son únicamente del precio de la planta y la mano de obra de la plantación de esta. Para T1, los adicionales corresponden al precio de los tres productos de bioestimulante aplicados, ya sea en vivero, como en el momento de la plantación. T2 contempla únicamente el precio de la planta y la mano de obra al igual que el tratamiento control. Para T3, se consideró adicionalmente el precio de la malla raschel negra y la hechura de esta, ya que se mandó coser para formar un cilindro y ser instalado alrededor de cada individuo.

Cuadro 2. Precio unitario por planta de cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	Precio planta + mano de obra	Costos adicionales	Costo total por planta
T0	\$1.264	\$0	\$1.264
T1	\$1.264	\$56	\$1.320
T2	\$1.264	\$0	\$1.264
T3	\$1.264	\$576	\$1.840

T0 = tratamiento control; **T1**= tratamiento con bioestimulante; **T2** = tratamiento casilla; **T3** = tratamiento con malla raschel.

Posteriormente, se propuso generar una matriz que analiza la costo-efectividad de los tratamientos evaluados mediante un índice de efectividad que contempla la supervivencia, la tasa de crecimiento en largo y en diámetro a la altura del cuello de las plantas, como indicadores claves para evaluar su desempeño. Este índice se construyó normalizando los valores de las medias de las tasas de crecimiento. Se utilizó el valor de las medias, dividida por la media mayor de los tratamientos y multiplicada por 100, dando así un valor de 0 a 100, quedando la media máxima como 100. En el caso de la supervivencia se utilizó el % bruto sin normalización adicional.

$$\text{Valor normalizado} = \left(\frac{\bar{x} \text{ de la variable}}{\bar{x} \text{ máxima de la variable}} \right) \times 100 \quad [1]$$

Luego estos tres datos ya normalizados se promediaron para obtener un índice de efectividad el cual se dividió por el costo unitario de cada planta por tratamiento, dando como resultado un índice que representa la relación entre desempeño y costo.

Todas aquellas variables de desempeño e índices resultantes se expresaron en tablas de la siguiente manera:

Supervivencia (%) representa el porcentaje de plantas vivas al final del periodo de evaluación bajo cada tratamiento.

Tasa Crec. Largo corresponde al valor normalizado a una escala de 0 a 100, de la tasa de crecimiento en largo, utilizando como referencia el valor máximo de las medias de los tratamientos.

Tasa de Crec. DAC corresponde al valor normalizado a una escala de 0 a 100, de la tasa de crecimiento en DAC, utilizando como referencia el valor máximo de las medias de los tratamientos

Índice de efectividad corresponde al promedio de las tres variables seleccionadas.

Costo por planta (CLP) indica el valor asociado a cada tratamiento, expresado en pesos chilenos, considerando el costo base de la planta más los insumos aplicados.

Índice de Costo-Efectividad expresa la relación entre desempeño y costo, calculado dividiendo el índice de efectividad por el costo total por planta.

3. RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados obtenidos a partir de la evaluación de supervivencia, crecimiento aéreo y desarrollo foliar de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua* en los cuatro tratamientos aplicados. Los datos corresponden a tres periodos de medición entre agosto de 2024 y marzo 2025, y se organizan por variable y especie.

3.1 Supervivencia

La supervivencia total (%) de *Nothofagus dombeyi* bajo los distintos tratamientos se presenta en la figura 2.

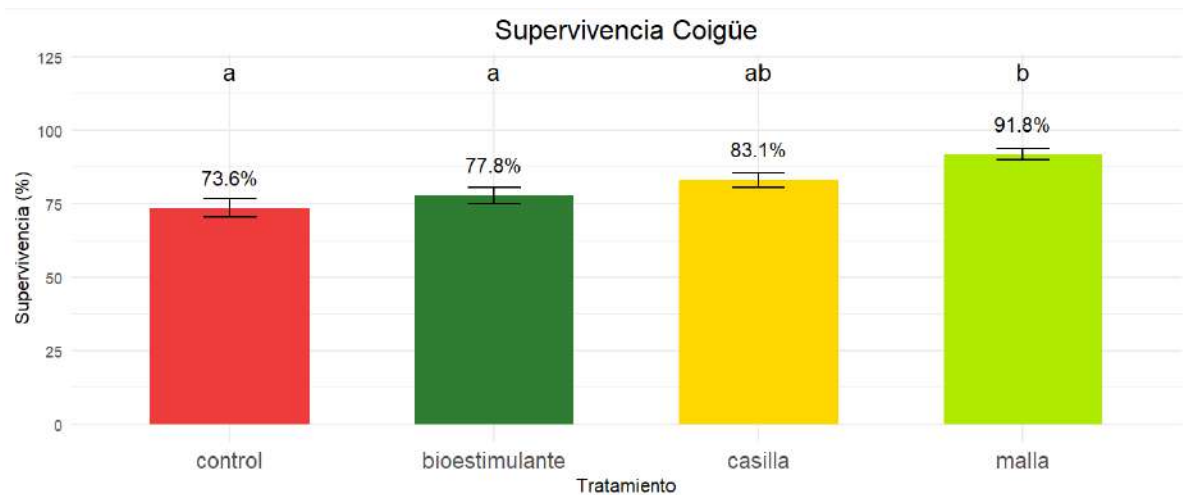


Figura 2. Supervivencia total (%) de *Nothofagus dombeyi* (coigüe) bajo los distintos tratamientos aplicados. Control en rojo, bioestimulante en verde, casilla en amarillo y malla en verde limón. las barras muestran la media (%) con el error estándar (\pm), mientras que letras sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 26,68$, $p < 0,001$), seguida de comparación post hoc de Dunn con ajuste de Bonferroni ($p < 0,05$).

La supervivencia de *N. dombeyi* fue significativamente mayor en el tratamiento malla con un 91.8% en comparación con el control que obtuvo un 73,6% y el bioestimulante con un 77,8%, los cuales no difirieron entre sí. El tratamiento casilla mostró un valor intermedio alcanzando un 83,1%, siendo estadísticamente similar tanto al control como malla y bioestimulante. Estas diferencias sugieren que la protección física tipo malla pudo haber generado condiciones más favorables para la supervivencia inicial de las plantas.

La supervivencia de *N. obliqua* se muestra en la figura 3.

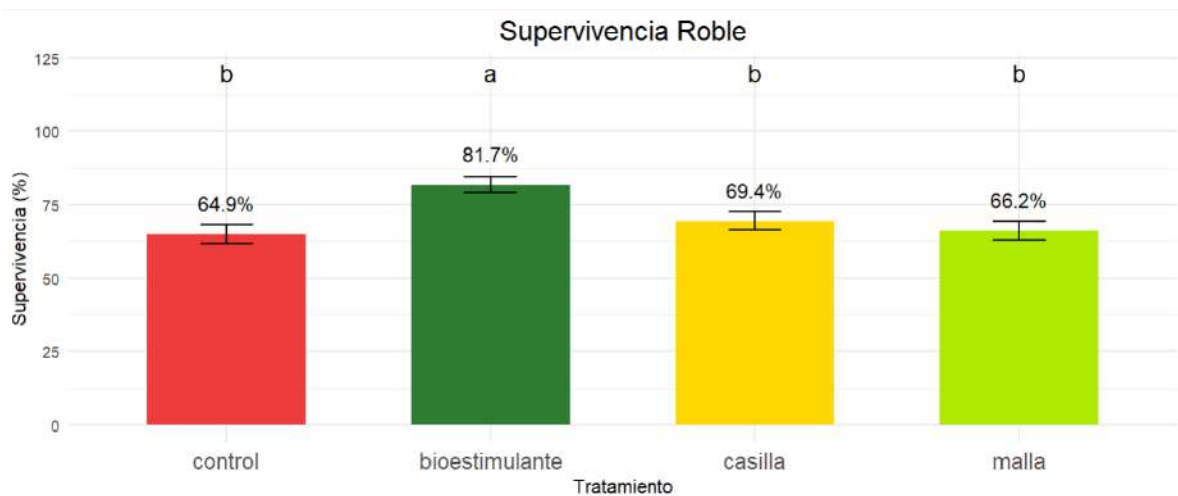


Figura 3. Supervivencia total (%) de *Nothofagus obliqua* (roble) bajo los distintos tratamientos aplicados. Control en rojo, bioestimulante en verde, casilla en amarillo y malla en verde limón. Las barras muestran la media \pm error estándar, mientras que letras sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 18,2$, $p < 0,001$), seguida de comparación post hoc de Dunn con ajuste de Bonferroni ($p < 0,05$).

El tratamiento con bioestimulante presentó el mayor porcentaje de supervivencia promedio (81,7%), significativamente superior al resto de los tratamientos. En contraste, los tratamientos control (64,9%), casilla (69,4%) y malla (66,2%) no difirieron significativamente entre sí y se agruparon en la misma categoría estadística (letra b). Estos resultados sugieren que el uso de bioestimulantes tuvo un efecto positivo en la supervivencia de las plantas de roble durante el periodo de estudio, posiblemente asociado a una mayor tolerancia al estrés o mejor establecimiento post-trasplante.

3.2 Tasas de crecimiento en largo

La figura 4 muestra la evolución de la tasa de crecimiento en largo para *N. dombeyi* durante los 7 meses de estudio.

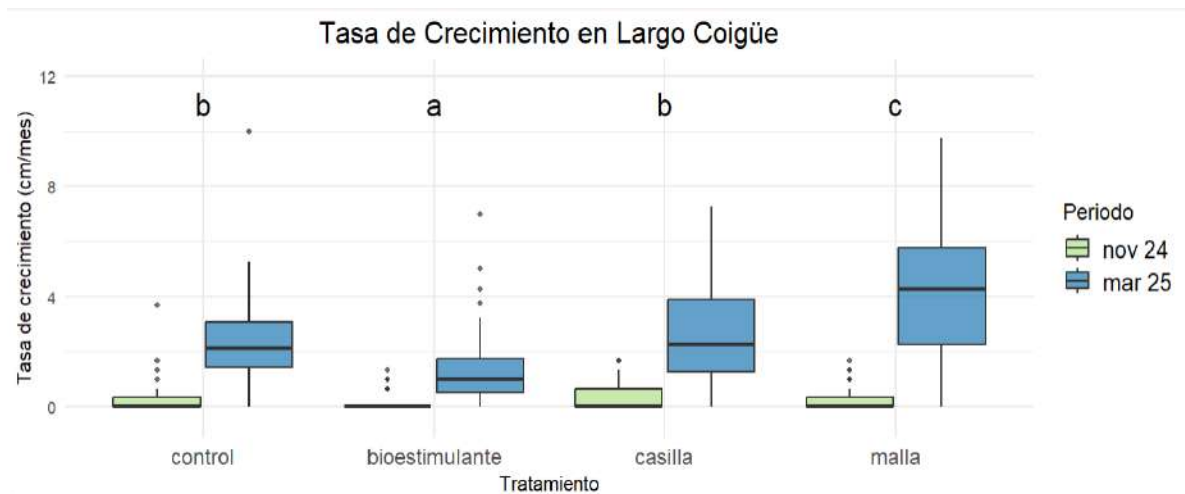


Figura 4. Tasa de crecimiento en largo (cm/mes) de *Nothofagus dombeyi* bajo los distintos tratamientos aplicados durante los periodos de evaluación noviembre 2024 y marzo 2025.

En la figura 4 se observan diferencias significativas entre tratamientos en el periodo de marzo 2025, determinadas mediante prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 155,840$, $p < 0,001$) seguida del test de Dunn con ajuste de Bonferroni ($p < 0,05$). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas.

El tratamiento con malla raschel presentó el mayor crecimiento, siendo significativamente superior al control y al tratamiento bioestimulante el cual obtuvo el menor desempeño. El tratamiento casilla también mostró una respuesta significativamente mayor que el bioestimulante, aunque no se diferenciaron estadísticamente del control. En contraste, en el periodo “nov 24” no se observaron diferencias claras entre tratamientos, manteniéndose valores bajos de crecimiento en todos los casos.

En la figura 5 se puede observar la tasa de crecimiento en largo para roble durante los 7 meses de estudio.

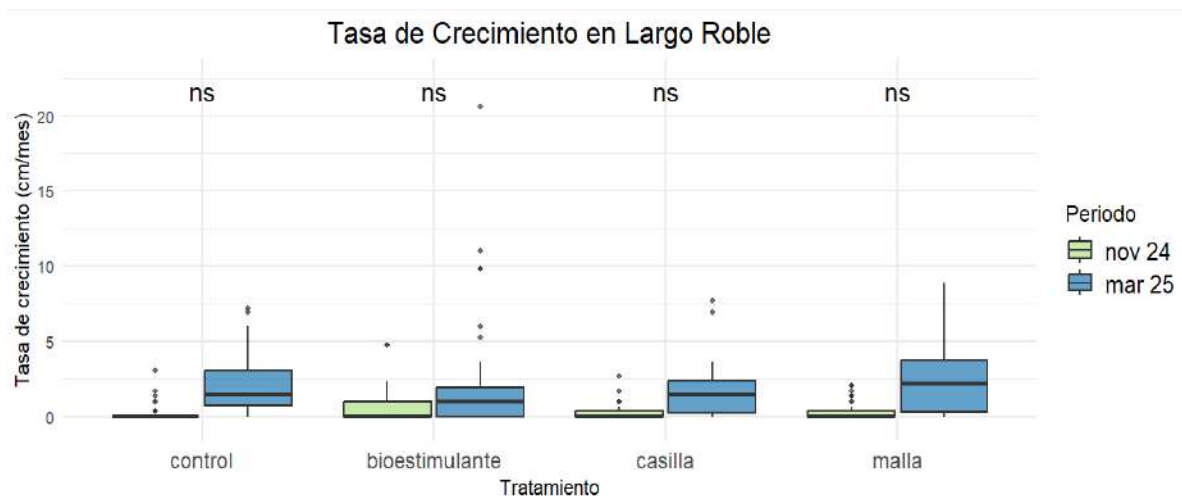


Figura 5. Tasa de crecimiento en largo (cm/mes) de *Nothofagus obliqua* bajo los distintos tratamientos aplicados durante los periodos de evaluación noviembre 2024 y marzo 2025.

En *N. obliqua*, los tratamientos evaluados no mostraron diferencias significativas “ns” en la tasa de crecimiento en largo (figura 5), según la prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 6,410$, $p = 0,093$). Si bien se observa un leve aumento del crecimiento en el periodo de marzo 2025, especialmente en el tratamiento de malla, no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, lo que sugiere una respuesta homogénea del roble bajo la aplicación de los distintos tratamientos en términos de crecimiento apical durante el periodo de estudio.

3.3 Tasas de crecimiento de diámetro a la altura del cuello

La figura 6 ilustra la tasa de crecimiento en diámetro a la altura del cuello (DAC) de *N. dombeyi*.

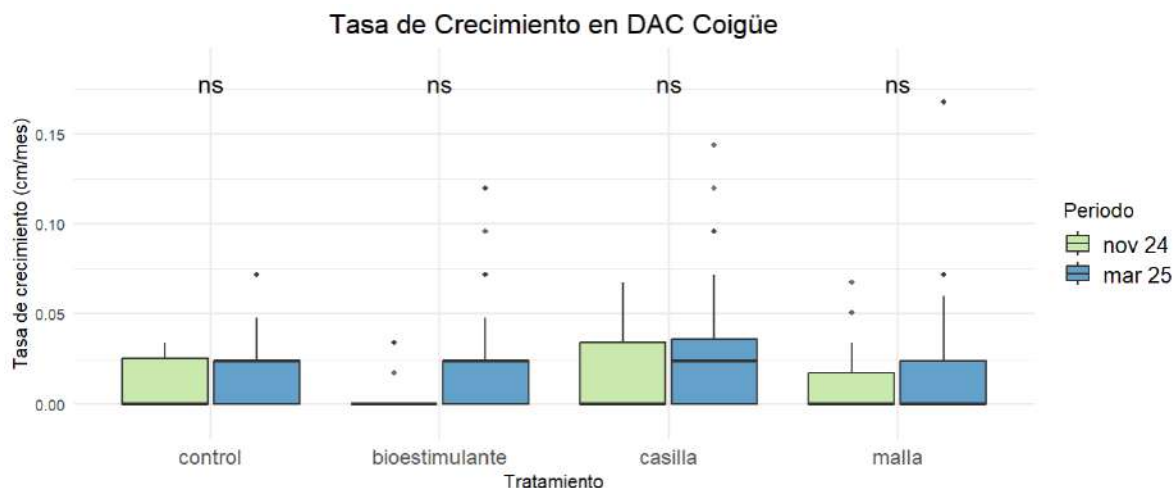


Figura 6. Tasa de crecimiento en diámetro a la altura del cuello (DAC) por mes de *Nothofagus dombeyi* (coigüe) bajo los distintos tratamientos aplicados durante los periodos de evaluación noviembre 2024 y marzo 2025.

La prueba de Kruskal-Wallis indicó ausencia de diferencias significativas en la tasa de crecimiento en DAC entre tratamientos ($\chi^2 = 3,240$, $p = 0,355$), señalando que ninguno de ellos promovió un aumento diferenciable del diámetro basal en *N. dombeyi*. Aunque el tratamiento casilla mostró una leve tendencia al aumento en el segundo periodo (marzo 2025) esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Esto sugiere que, bajo las condiciones del estudio, los tratamientos aplicados no influyeron de forma clara sobre el crecimiento radial de la especie.

La figura 7 presenta la tasa de crecimiento en DAC de *N. obliqua*.

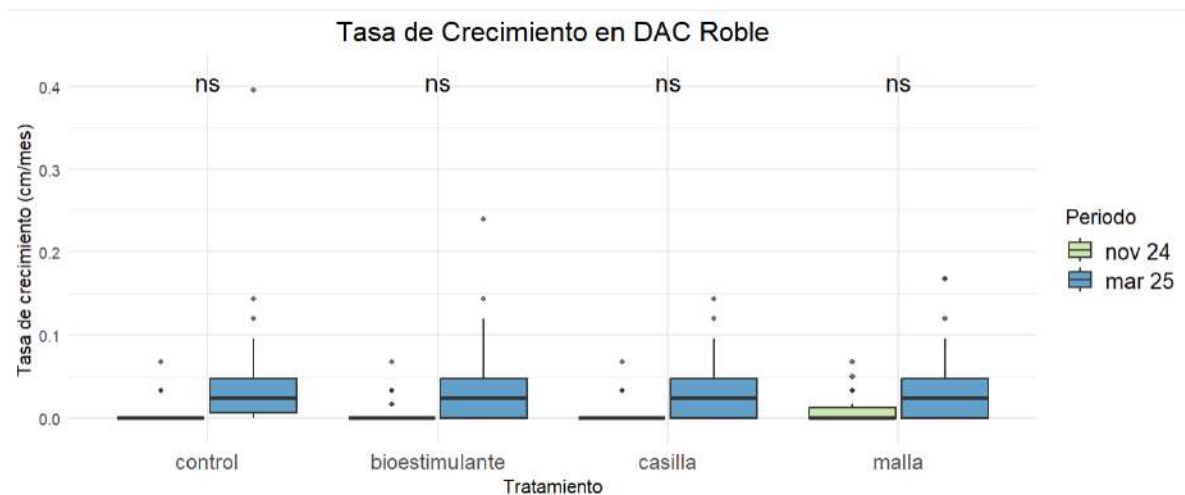


Figura 7. Tasa de crecimiento en diámetro a la altura del cuello (DAC) por mes de *Nothofagus obliqua* (roble) bajo los distintos tratamientos aplicados durante los periodos de evaluación noviembre 2024 y marzo 2025.

El análisis Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 0,971$, $p = 0,808$) mostró que no hubo diferencias significativas en la tasa de crecimiento en DAC de *N. obliqua* entre los tratamientos aplicados. Si bien se observa un leve aumento generalizado en el segundo periodo (marzo 2025), especialmente en el tratamiento bioestimulante, este no constituyó a una diferencia significativa. Esto indica que las intervenciones no generaron un efecto diferencial marcado sobre el crecimiento radial del roble en el corto plazo.

3.4 Número de hojas

El número de hojas por planta de *N. dombeyi* durante todos los periodos de evaluación se muestran en la figura 8.

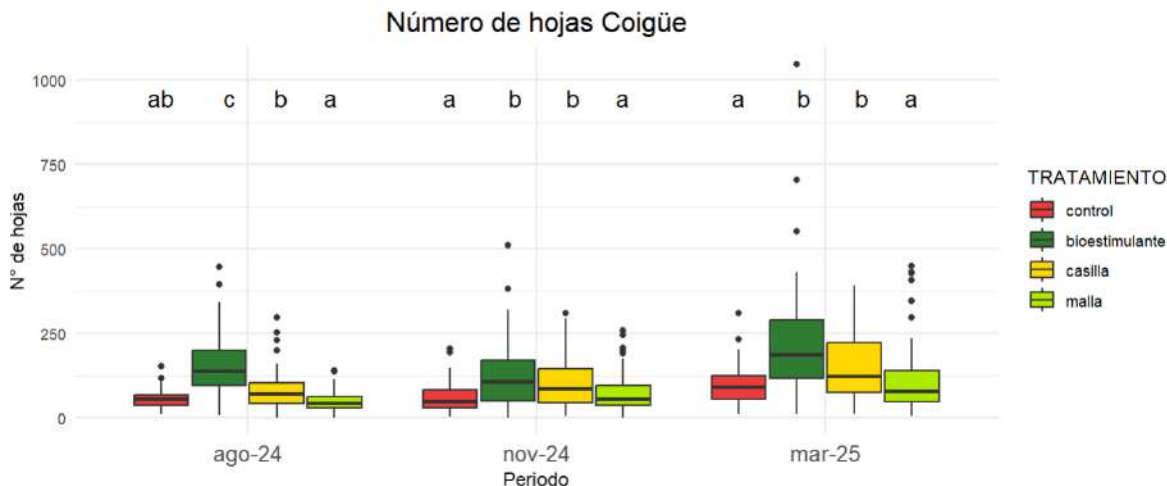


Figura 8. Número de hojas por planta de *Nothofagus dombeyi* en los distintos tratamientos aplicados y periodos evaluados correspondientes a agosto 2024, noviembre 2024 y marzo 2025. Control en rojo, bioestimulante en verde, casilla en amarillo y malla en verde limón. Se presentan los valores mediante boxplots, y sobre cada grupo se indican las letras de significancia derivadas del análisis post hoc.

El análisis de desviación (prueba chi-cuadrado de Wald tipo II) indicó un efecto significativo entre tratamientos ($\chi^2 = 85,675$, $p < 0,001$) y periodos ($\chi^2 = 138,512$, $p < 0,001$), así como de su interacción ($\chi^2 = 39,817$, $p < 0,001$). Esto evidencia que el número de hojas en coigüe varió de manera significativa entre tratamientos, periodos y también dependiendo de la combinación de ambos factores.

El análisis post hoc Tukey señaló que, en agosto 2024 el tratamiento bioestimulante presentó el mayor número de hojas, siendo significativamente superior al de casilla, control y malla. En el segundo periodo evaluado, bioestimulante y casilla mostraron un número de hojas significativamente mayor que control y malla, los que no presentaron diferencias entre sí. En marzo 2025 se repite este patrón, manteniéndose bioestimulante y casilla con los valores más altos, mientras control y malla presentaron valores menores.

La figura 9 muestra la variación en el número de hojas de *N. obliqua* durante todos los periodos evaluados durante el estudio.

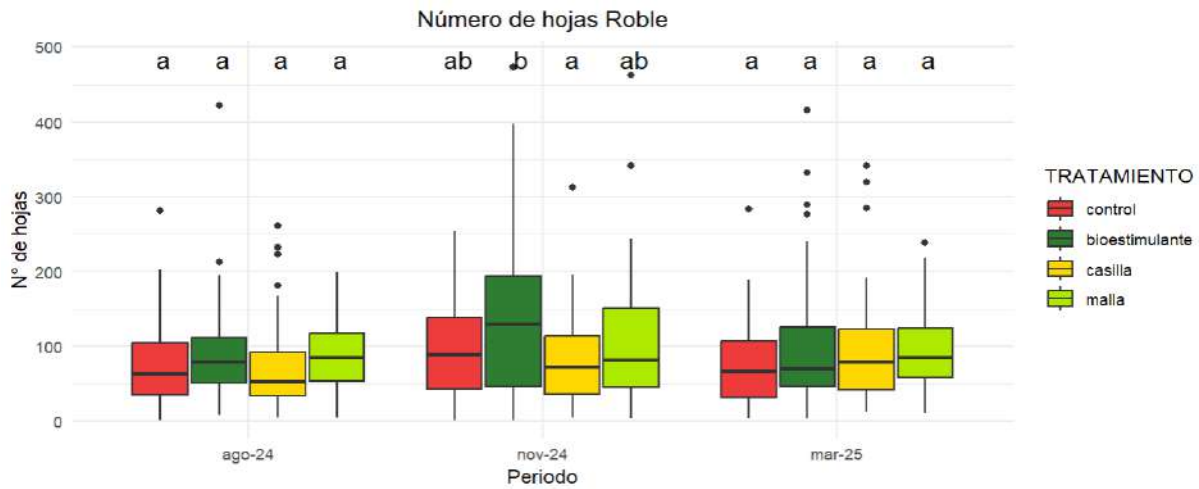


Figura 9. Número de hojas por planta de *Nothofagus obliqua* en los distintos tratamientos aplicados y periodos evaluados correspondientes a agosto 2024, noviembre 2024 y marzo 2025. Control en rojo, bioestimulante en verde, casilla en amarillo y malla en verde limón. Se presentan los valores mediante boxplots, y sobre cada grupo se indican las letras de significancia derivadas del análisis post hoc.

El análisis de desviación (prueba chi-cuadrado de Wald tipo II) mostró un efecto significativo de los factores tratamiento ($\chi^2 = 10,93$, $p < 0,001$) y periodo ($\chi^2 = 16,33$, $p < 0,001$) sobre el número de hojas en roble, mientras que la interacción entre estos no resultó significativa ($\chi^2 = 8,88$, $p < 0,181$).

El análisis post hoc Tukey indicó que en agosto 2024 y marzo 2025 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en noviembre 2024 el tratamiento bioestimulante presentó un número de hojas significativamente mayor que casilla, mientras que control y malla se ubicaron en un rango intermedio sin diferir significativamente de bioestimulante ni de casilla.

3.5 Área foliar específica

El comportamiento del área foliar específica bajo los distintos tratamientos durante todos los periodos evaluados se presenta en la figura 10.

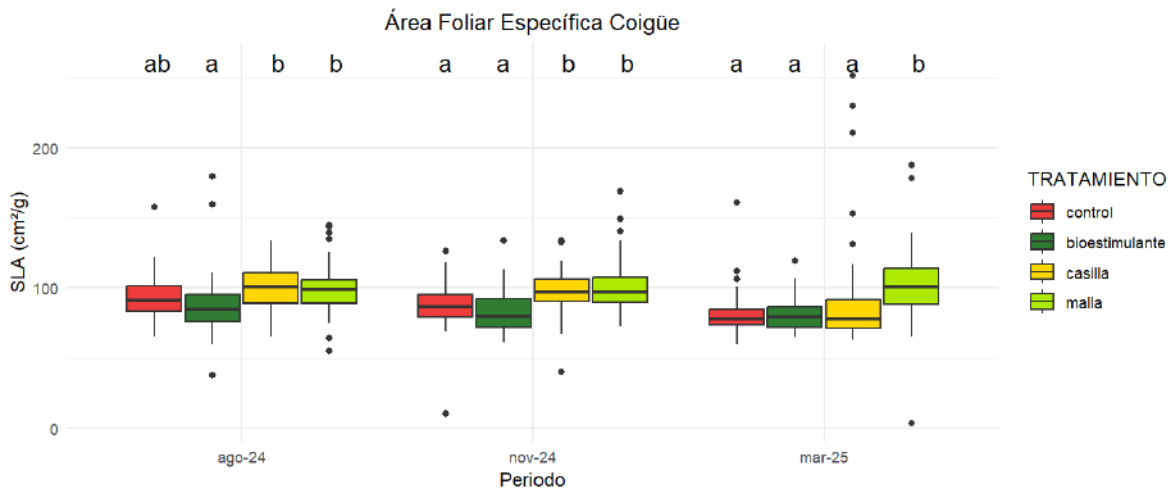


Figura 10. Área foliar específica de *Nothofagus dombeyi* bajo distintos tratamientos aplicados y periodos evaluados correspondientes a agosto 2024, noviembre 2024 y marzo 2025. Control en rojo, bioestimulante en verde, casilla en amarillo y malla en verde limón. Se presentan los valores mediante boxplots, y sobre cada grupo se indican las letras de significancia derivadas del análisis post hoc.

El análisis de desviación (prueba chi-cuadrado de Wald tipo II) mostró un efecto significativo de los factores tratamiento ($\chi^2 = 28,53$, $p < 0,001$) y periodo ($\chi^2 = 24,28$, $p < 0,001$) así como de su interacción ($\chi^2 = 20,59$, $p < 0,002$).

El análisis post hoc indicó que, en agosto 2024 los tratamientos casilla y malla presentaron un área foliar específica significativamente mayor que bioestimulante, en cambio control presentó un rango intermedio (ab) sin diferir significativamente de casilla ni bioestimulante. Durante el segundo periodo, casilla y malla presentaron los valores de SLA significativamente superiores a bioestimulante y control, los cuales no presentaron diferencias significativas entre sí. Por último, en marzo 2025, malla mostró un SLA significativamente mayor que los demás tratamientos, los cuales no difirieron entre sí.

3.6. Análisis de costo-efectividad

El desempeño y los costos asociados a los tratamientos aplicados en *N. dombeyi* se muestran en el cuadro 3.

Análisis costo-efectividad *N. dombeyi*

Cuadro 3. Análisis de costo-efectividad de los distintos tratamientos aplicados a *Nothofagus dombeyi* (coigüe). El índice propuesto fue calculado promediando los valores normalizados de supervivencia y tasas de crecimiento para ser dividido por el costo por planta, donde valores más cercanos a 0 indican una relación costo beneficio menos favorable.

Tratamiento	Supervivencia (%)	Tasa Crec. Largo	Tasa Crec. DAC	Índice de Efectividad	Costo por Planta (CLP)	Índice Costo-Efectividad
T0	73,6	58	75,45	69,02	\$1.264	0,055
T1	77,8	30,39	82,72	63,64	\$1.320	0,048
T2	83,1	66,77	100	83,29	\$1.264	0,066
T3	91,8	100	82,72	91,51	\$1.840	0,050

T0 = tratamiento control; **T1** = tratamiento con bioestimulante; **T2** = tratamiento casilla; **T3** = tratamiento con malla raschel.

La tabla presenta los resultados del análisis de costo-efectividad de los distintos tratamientos aplicados a *Nothofagus dombeyi* (coigüe) considerando tres variables clave de desempeño: supervivencia, tasa de crecimiento en largo (cm) y tasa de crecimiento en DAC (cm), combinadas en un índice compuesto de efectividad para proporcionar una visión integral de la respuesta de cada tratamiento.

El tratamiento T3 (malla) es el más efectivo, con un índice de 91,51, lo que sugiere que obtuvo el mejor rendimiento general en términos de crecimiento y supervivencia en plantas de coigüe, sin embargo, su elevado costo unitario (\$1.840) resulta en un índice de costo-efectividad inferior al de T2.

El T2 (casilla) mostró un buen rendimiento, con un índice de efectividad de 83,29, siendo notablemente superior a T0 y T1, y un bajo costo (\$1.264) lo que dio con el mayor índice de costo-efectividad (0,066), lo que indica que, a pesar de no poseer la mayor efectividad en términos ecológicos, fue el más eficiente en relación con su costo.

Por su parte el tratamiento T1 (bioestimulante) registró el índice de efectividad y costo-efectividad más bajos (0,048), evidenciando un rendimiento desfavorable con relación a su inversión.

El tratamiento T0 (control) mostró un desempeño intermedio, con un índice de efectividad de 69,02 y un valor de costo-efectividad de 0,055, indicando que, sin intervención adicional, puede ofrecer un buen rendimiento en función de su bajo costo.

El desempeño y los costos asociados a los tratamientos aplicados en *N. obliqua* se muestran en el cuadro 4.

Análisis costo-efectividad *N. obliqua*

Cuadro 4. Análisis de costo-efectividad de los distintos tratamientos aplicados a *Nothofagus obliqua* (roble)

Tratamiento	Supervivencia (%)	Tasa Crec. Largo	Tasa Crec. DAC	Índice de Efectividad	Costo por Planta (CLP)	Índice Costo-Efectividad
T0	64,9	79,63	100	81,51	\$1.264	0,064
T1	81,7	76,11	88,23	82,01	\$1.320	0,062
T2	69,4	64,12	70,58	68,03	\$1.264	0,054
T3	66,2	100	82,35	82,85	\$1.840	0,045

T0 = tratamiento control; **T1**= tratamiento con bioestimulante; **T2** = tratamiento casilla; **T3** = tratamiento con malla raschel.

El cuadro presenta los resultados del análisis comparativo entre los cuatros tratamientos aplicados a *Nothofagus obliqua*, considerando tanto el desempeño ecológico (supervivencia y crecimiento) como su costo.

Se observa que T3 (malla) obtuvo el índice de efectividad más alto (82,85), asociado principalmente a su crecimiento en largo. Sin embargo, su elevado costo por planta, lo posiciona como el menos eficiente económicamente, con un índice de costo-efectividad de 0,045.

En contraste, los tratamientos T0 (control) y T1 (bioestimulante) evidenciaron un buen equilibrio entre rendimiento y costo. Ambos mostraron índices de efectividad similares (81,51 y 82,01 respectivamente), pero el tratamiento control destacó por su menor costo (\$1.264), alcanzando así el mayor índice de costo-efectividad (0,064), seguido de cerca por T1 (0,062).

Por último, el tratamiento T2 (casilla) registró un índice de efectividad menor (68,03), lo que sugiere una eficiencia moderada pero no sobresaliente en relación con los demás tratamientos

4. DISCUSIÓN

El presente estudio evaluó los efectos de un bioestimulante radicular y dos técnicas de manejo tradicional (casilla y malla raschel) sobre la supervivencia y desarrollo inicial de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua* bajo condiciones de campo. Los resultados obtenidos revelan diferencias entre especies y tratamientos las cuales se analizan a continuación.

Coigüe presentó un desempeño superior en términos de altura, diámetro y supervivencia, manteniéndose de forma consistente en los distintos tratamientos aplicados, lo cual podría atribuirse a una mayor plasticidad ecológica y adaptación a las condiciones del sitio experimental. Este patrón de mayor vigorosidad en coigüe ha sido documentado en estudios previos, como lo es el de Piper *et al.* (2007) y Herrera (2014) que reportan que *N. dombeyi* exhibe una mayor tolerancia al estrés hídrico en comparación con otras especies de *Nothofagus*, lo que podría haberle conferido una ventaja competitiva durante las primeras etapas de establecimiento. Asimismo, Grosse (1988) indica que esta especie responde positivamente a condiciones de buena disponibilidad hídrica y luminosa, lo que se condice con las condiciones observadas en el ensayo experimental. En contraste, roble suele presentar un crecimiento más lento en las fases iniciales y una mayor sensibilidad a condiciones de sombra y suelos muy húmedos (Donoso *et al.* 1999), lo que podría explicar su menor tasa de crecimiento y supervivencia relativa.

En términos generales, se observó una alta supervivencia inicial de las plántulas de ambas especies, lo cual representa un resultado positivo considerando que los ensayos de restauración en zonas desprovistas de vegetación pueden presentar elevadas tasas de mortalidad en etapas tempranas. Esta tendencia puede explicarse por una combinación de factores tanto bióticos como abióticos. De hecho, análisis globales han reportado que la supervivencia promedio de plantaciones en restauración ecológica suele ser relativamente baja, con tasas promedio de éxito cercanas al 44% a nivel mundial debido a

limitaciones de microclima, calidad de planta y manejo inadecuado (Catterall *et al.* 2012; Meli *et al.* 2017).

Esta positiva respuesta se asocia en primer lugar, a que el estado fisiológico y morfológico de las plantas al momento de la plantación fue adecuado ya que cumplían con estándares de calidad mínimos de producción. La adecuada lignificación, el tamaño y la humedad radicular suficiente, pueden haber contribuido a una mejor adaptación post trasplante, tal como lo sugieren Grossnickle & MacDonald (2018) con relación a la calidad de planta como predictor de una restauración forestal exitosa.

En segundo lugar, las condiciones meteorológicas durante el periodo de evaluación fueron relativamente favorables, sin eventos de sequía extremos o heladas fuera de temporada, lo que permitió un establecimiento menos estresante para las plántulas (Meteochile 2024, 2025). En sequía, la demanda evaporativa aumenta, las plantas cierran estomas, disminuye la fotosíntesis y crece el riesgo de fallo hidráulico, afectando la supervivencia (Oren *et al.* 1999; Piper *et al.* 2007, 2011). En cambio, las heladas tardías dañan meristemas y hojas en expansión y pueden inducir embolismo por congelación-deshielo en el xilema, limitando la conductividad y el crecimiento inicial (Mayr & Sperry 2009; Sakai & Larcher 1987; Pallardy 2008). Esto es relevante en climas templado-húmedos como el del sur de Chile, donde la variabilidad interanual puede afectar significativamente los resultados de plantación.

Además, factores como la presencia del estero Mañedehue en el área de estudio que puede fomentar la disponibilidad hídrica a través de un mayor contenido de humedad edáfica en su zona de influencia (Echeverría *et al.* 2007), el efecto nodriza, entendido como la facilitación micro climática y edáfica que proporcionan plantas o estructuras existentes a plántulas o especies acompañantes que podría proporcionarle el parche de bosque nativo que se encuentra bordeando la parte sur del ensayo (Callaway 1995), y la adecuada preparación del terreno, mediante limpieza de vegetación competitiva y nivelación pueden explicar la alta supervivencia general observada.

Según Padilla y Pugnaire (2007), el contenido de humedad en el suelo es uno de los principales factores que determinan el éxito de establecimiento de plántulas de especies leñosas mediterráneas, hecho que pudiese extenderse a especies templadas como *Nothofagus*.

Por otra parte, el uso de técnicas de manejo y la aplicación de bioestimulante parece haber promovido condiciones micro ambientales más estables o mejorado el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes. Diversos estudios destacan el efecto positivo de productos como *Trichoderma spp.* y *Bacillus spp.* en la mejora del crecimiento y la tolerancia al estrés abiótico al favorecer el desarrollo de raíces, modular el sistema hormonal de la planta y mejorar la disponibilidad de nutrientes (Harman *et al.* 2004;

Santoyo *et al.* 2021). Si bien los efectos de estos productos no fueron estadísticamente significativos en todos los casos, el rendimiento observado sugiere una posible sinergia positiva.

El diseño experimental, a pesar de ser efectivo para establecer comparaciones entre tratamientos, presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. Una de ellas es el corto periodo de evaluación (7 meses aprox.) lo que limita la observación de respuestas a ecológicas de largo plazo, tales como el establecimiento definitivo de las plantas, la competencia interespecífica, o la resiliencia frente a eventos climáticos extremos. Esto es especialmente relevante considerando que muchas respuestas funcionales y estructurales en restauración forestal se manifiestan de manera gradual (Gann *et al.* 2019).

Un aspecto metodológico relevante de este estudio que se debe considerar es la aplicación exclusiva del producto BAFEX-N al grupo bioestimulante semanas antes de la plantación en el área de estudio, siguiendo las recomendaciones comerciales del fabricante como manejo fitosanitario. Este producto actúa mediante la colonización rápida de la rizosfera y la producción de metabolitos con efecto nematocida y promotor del crecimiento. Se ha reportado que *Bacillus spp.* pueden establecerse en la rizosfera dentro de 24-48 horas tras su aplicación, generando efectos sostenidos durante semanas a meses dependiendo de las condiciones edáficas (Kloepper *et al.* 2004; Migunova & Sasanelli 2021). Sin embargo, la aplicación exclusiva de este producto al tratamiento bioestimulante (T1) constituye una limitación metodológica, pues impide aislar los efectos específicos de los bioestimulantes aplicados en terreno. Aunque no fue posible evaluar los efectos aislados de *Bacillus spp.* en este ensayo experimental, es importante destacar que su acción positiva ha sido ampliamente documentada en el ámbito agrícola, donde se ha observado una mejora en la sanidad radicular, la resistencia a patógenos y el rendimiento de cultivos (Zhang *et al.* 2023).

La combinación de BAFEX-N con los demás bioestimulantes podría haber generado competencia o un efecto sinérgico que mejoró la calidad del sustrato radicular y el vigor de las plantas, aunque esta respuesta no puede atribuirse a la combinación de productos aplicados. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse con cautela ya que la acción combinada de BAFEX-N y Centeon Max y SP-1 es un factor desconocido que limita la interpretación clara de los efectos atribuibles a cada insumo.

A esto se le suma la ausencia de una evaluación directa a las raíces de las plantas, lo que impide observar el desarrollo radicular y las interacciones de las raíces con el suelo y los microorganismos presentes. El análisis se ha centrado únicamente en la parte aérea de las plántulas, siguiendo los parámetros establecidos en el protocolo de CONAF para estudios de restauración, el cual se enfoca en mediciones del crecimiento en altura y diámetro. Aunque estos indicadores son útiles para evaluar el

desempeño inicial de las plantas, no reflejan completamente su desarrollo radicular, el cual es fundamental para entender la resistencia al estrés hídrico, la absorción de nutrientes y la interacción con el suelo. No obstante, aunque las raíces no fueron observadas directamente, es plausible suponer que, si las plantas mostraron buen desempeño en la parte aérea, podría inferirse que las raíces siguen una evolución similar, dada la relación simbiótica y funcional de ambas partes. Es bien conocido que un adecuado crecimiento aéreo generalmente está asociado con un buen desarrollo del sistema radicular, ya que las raíces cumplen las funciones básicas como el suministro de agua, nutrientes y la estabilidad de la planta (Shekhar *et al.* 2018; Schenk & Jackson 2002). Por lo tanto la falta de medición de las raíces limita la capacidad para interpretar de manera integral la respuesta de las plántulas a los tratamientos, especialmente en el caso de los bioinsumos y la competencia microbiana.

Un elemento adicional relevante fue la limitada capacidad de control sobre el área de estudio, al tratarse de un terreno que pertenece a un propietario privado, quien dispuso aquel lugar para el estudio. Durante el periodo de evaluación se observó el paso de una máquina por un espacio entre parcelas, lo cual generó surcos en el terreno y afectó directamente a algunos individuos. A pesar de que el impacto no fue considerable, debido al gran tamaño muestral del ensayo, este tipo de intervención externa no planificada introduce una fuente de perturbación que puede sesgar los resultados y debe ser considerada como una limitación del estudio. Estos aspectos deben considerarse en futuras investigaciones con mayor control o monitoreo complementario.

No obstante, el ensayo sirvió como una línea base valiosa, generando información preliminar sobre la respuesta de coigüe y roble a distintas combinaciones de tratamientos silviculturales y bioestimulantes. En este sentido, puede considerarse como un estudio piloto que entrega insumos relevantes para el diseño de investigaciones futuras más extensas, en el marco de la restauración ecológica.

Como se mencionó anteriormente, la supervivencia de las plántulas fue alta en general, lo cual sugiere condiciones ambientales adecuadas para el establecimiento inicial. Sin embargo, se observaron diferencias significativas entre tratamientos, destacando la malla raschel como el más efectivo. Este efecto positivo puede explicarse por su capacidad de modificar el microclima inmediato de la planta, pues las mallas actúan como barreras físicas que reducen la pérdida de agua por evapotranspiración, protegen contra la radiación solar directa, disminuyen el impacto del viento y depredación de herbívoros, lo cual aumenta la tasa de éxito en el establecimiento de las plántulas (González & Donoso 2019). Además, al minimizar el estrés abiótico durante las etapas críticas posteriores a la plantación, la malla contribuye a una mejor retención de humedad en el suelo circundante y a una temperatura más moderada

en el cuello de la planta, condiciones que han sido identificadas como determinantes para la supervivencia temprana (Padilla & Pugnaire 2007).

En contraste, el tratamiento control, que no posee ninguna intervención adicional, mostró la menor supervivencia, lo que indica que, incluso bajo condiciones de suelo y clima favorables, las plantas de *N. dombeyi* y *N. obliqua* se benefician de acciones que modulen el entorno inmediato, tal como ha sido reportado en estudios previos sobre establecimiento de especies nativas (Martínez-Herrera *et al.* 2023).

En relación con la tasa de crecimiento en largo, se observaron diferencias marcadas entre tratamientos, especialmente en *N. dombeyi*, donde el uso de malla raschel y la casilla favorecieron una mayor elongación del tallo en comparación con el control y el bioestimulante, siendo este último el que presentó el menor desempeño. Este patrón de diferencias entre especies concuerda con hallazgos de Donoso *et al.* (2015), quienes reportaron que el coigüe crece más rápido que otras especies del género en condiciones controladas, especialmente en condiciones con mayor acceso a luz. En el caso de la malla, este resultado es coherente con su capacidad para generar un microambiente más favorable al crecimiento, al reducir la evapotranspiración, atenuar el estrés hídrico y proteger contra radiación solar intensa, como ha sido evidenciado en estudios previos de González & Donoso (2019).

Además, el aumento en longitud en estas condiciones de sombra en especies intolerantes como el coigüe podría interpretarse como una respuesta de escape a la sombra (shade avoidance), una estrategia adaptativa que favorece la elongación del tallo en ambientes de competencia por luz (Franklin 2008). A esto se suma que, bajo estructuras protectoras, se reduce la transpiración, lo que permite una mejor turgencia celular, favoreciendo la expansión del tejido meristemático apical (Smith & Whitelam 1997).

El positivo desempeño del tratamiento casilla sobre el crecimiento en largo de las plantas, sugiere que las condiciones edáficas tuvieron un papel determinante en la facilitación del alargamiento apical. Este resultado coincide con estudios que destacan la importancia del descompactamiento y la porosidad del suelo en el crecimiento aéreo de plántulas, sobre todo en especies que poseen raíces profundas como las del género *Nothofagus* (Bengough *et al.* 2006). Tras la mejora de las condiciones físicas del perfil superficial, se facilita tanto la exploración radicular, como la absorción de agua y nutrientes, lo que puede traducirse en un mayor vigor del brote apical. (Leung *et al.* 2018). El acceso temprano a capas más profundas del suelo también puede otorgar ventajas frente a fluctuaciones en la humedad superficial, contribuyendo a un crecimiento más sostenido en el tiempo (Canadell *et al.* 1996; Schenk & Jackson 2002).

Por otro lado, el tratamiento bioestimulante no mostró un efecto significativo en el crecimiento en largo, lo que podría deberse a que los microorganismos hayan promovido un crecimiento radicular antes que aéreo (Donoso 2021).

Para *N. obliqua*, las diferencias en esta variable fueron menos marcadas y sin significancia estadística, lo que podría indicar una menor plasticidad fenotípica, al menos en el corto plazo, explicando así su menor respuesta relativa frente a modificaciones del microambiente. La ausencia de diferencias significativas también puede reflejar una estrategia ecológica de tolerancia al estrés, que prioriza el engrosamiento y desarrollo radicular por sobre la elongación aérea en condiciones limitantes (Piper *et al.* 2007; Riquelme-Buitano *et al.* 2023).

La tasa de crecimiento en DAC presentó diferencias más discretas entre tratamiento en ambas especies, siendo estas no significativas. Esta menor sensibilidad puede explicarse por un lado por el corto periodo de evaluación, considerando que el engrosamiento del tallo es una respuesta fisiológica que tiende a manifestarse más lentamente que el crecimiento en altura, especialmente en especies leñosas de crecimiento secundario como *Nothofagus*. Esto debido a que el desarrollo del grosor se encuentra estrechamente relacionado con procesos de lignificación, acumulación de biomasa estructural y formación de tejidos conductores, los cuales requieren mayor inversión de recursos a lo largo del tiempo (Pallardy 2008).

Otro aspecto relevante es que el crecimiento del DAC está fuertemente condicionado por la relación parte aérea/raíz y por la asignación preferencial de carbono hacia órganos estructurales en condiciones de estrés o competencia de recursos. Esto podría explicar por qué algunos tratamientos con efectos positivos en altura no presentaron un aumento equivalente en diámetro. En el caso de las plantas que se les aplicó bioestimulante, el efecto de este puede centrarse inicialmente en la expansión radicular o fisiológica más que en lo estructural visible (Grossnickle & MacDonald 2018; Yakhin *et al.* 2017).

En este contexto, el uso de la tasa de crecimiento en DAC como indicador del éxito temprano puede presentar limitaciones cuando se evalúa en periodos muy cortos, dado que su incremento es más lento y su valor predictivo puede ser menor para la supervivencia inicial bajo condiciones favorables (Cortina *et al.* 2006). Sin embargo, su seguimiento en el mediano plazo ofrece información valiosa sobre la estabilidad estructural de las plántulas y su potencial de sobrevivencia frente a factores como el viento, la competencia o el estrés hídrico prolongado. Diversos estudios que han examinado los atributos de las plantas han confirmado que el diámetro del tallo es uno de los indicadores más confiables del rendimiento en campo, ya que se correlaciona estrechamente con la biomasa inicial y el crecimiento durante el primer año de establecimiento (Grossnickle & MacDonald 2018).

Por otro lado, el número de hojas es un rasgo funcional relevante en plántulas, ya que refleja tanto su capacidad fotosintética y la eficiencia de captura recursos, como la estrategia de asignación de recursos ante condiciones ambientales específicas (Lambers *et al.* 2008). En este estudio se observaron diferencias significativas en *N. dombeyi*, donde el tratamiento con bioestimulantes presentó los valores más altos, seguido por casilla. En cambio, los tratamientos con malla raschel y control mostraron una menor producción foliar. Estos resultados podrían estar vinculados a la mayor disponibilidad de nutrientes promovida por la aplicación de bioestimulantes, permitiendo una estimulación del desarrollo foliar en etapas tempranas, a su vez, la mejora del drenaje y la aireación del suelo mediante el tratamiento casilla, podría haber facilitado una mayor actividad radicular, permitiendo una absorción más eficiente de agua y nutrientes, y así potenciar la producción de hojas (Rouphael & Colla 2020).

También cabe destacar que el número de hojas puede estar influenciado por la estrategia ecológica de cada especie y su capacidad de respuesta a condiciones limitantes. Estudios como el de Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013) señalan que las especies con tasas de crecimiento más conservadoras suelen priorizar la inversión en estructuras más resistentes o en raíces en lugar de una rápida expansión foliar. Esto podría explicar el desempeño más contenido en el tratamiento control, al igual que el caso de *Nothofagus obliqua*, en donde no se registraron diferencias significativas entre tratamientos durante el último periodo evaluado, lo que coincide con lo mencionado anteriormente que se trata de una menor plasticidad morfológica temprana de parte de esta especie.

El área foliar específica (SLA) es un rasgo funcional clave que refleja la estrategia ecológica de las plantas respecto al uso de recursos como luz y nutrientes. Valores altos de SLA suelen estar asociados a especies de rápido crecimiento, con una mayor tasa fotosintética por unidad de biomasa y con estrategias oportunistas bajo condiciones favorables, mientras que un SLA bajo se asocia a hojas más densas, longevas y resistentes, adecuadas para ambientes limitantes o de alta exposición. (Poorter *et al.* 2009).

En los resultados obtenidos se observaron diferencias significativas durante el último periodo evaluado, donde los tratamientos sin cobertura (control, bioestimulante, casilla) mostraron valores más bajos de SLA en comparación con la malla raschel. Esta respuesta sugiere que las plántulas bajo malla adoptaron una estrategia de adquisición rápida de recursos, posiblemente facilitada por un microambiente con mayor humedad relativa, menor radiación directa y temperaturas menos extremas, lo cual favorece la expansión foliar y reduce los costos estructurales del tejido (Niinemets 2001; Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013). Estas condiciones permiten a las plantas mantener un balance positivo de carbono sin la necesidad de adquirir estructuras foliares robustas, promoviendo hojas con mayor superficie y menor densidad. Sin embargo, estas hojas se encuentran más susceptibles al estrés hídrico

y al daño mecánico. Por tanto, un valor más elevado de área foliar específica puede resultar beneficioso en ambientes húmedos, ricos en nutrientes o de baja competencia, pero costoso en condiciones adversas.

Por el contrario, los demás tratamientos mostraron valores similares y estadísticamente más bajos, lo que podría reflejar una respuesta más conservadora, con hojas más densas y con mayor inversión estructural por unidad de área. Estas hojas tienden a ser más longevas, más resistentes a daños físicos y a la pérdida de agua, lo que se traduce en una estrategia para adaptarse a entornos limitantes en agua, nutrientes o luz (Niinemets 2001; Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013). Por ende, un SLA bajo puede interpretarse como una respuesta adaptativa positiva en contextos donde la eficiencia en el uso de recursos es prioritaria.

El SLA ha sido utilizado como un buen predictor del rendimiento fisiológico temprano y de la eficiencia fotosintética por unidad de inversión, ya que un valor elevado podría estar vinculado a un crecimiento acelerado y a una mayor captura de luz, como se pudo observar también en la tasa de crecimiento en altura. Bajo este contexto, los mayores valores de SLA en el tratamiento con malla raschel coinciden con su superior desempeño en otras variables de crecimiento, reforzando su efecto positivo integral en condiciones de restauración temprana (Poorter *et al.* 2009).

El rebrote en las plántulas se registró de forma complementaria para observar su capacidad de resiliencia frente a las condiciones dadas. *Nothofagus obliqua* presentó un total de 40 individuos con rebrote, en donde 16 de ellos fueron bajo tratamiento con bioestimulante, y el caso de *Nothofagus dombeyi* solo 10 individuos presentaron rebrote, en donde igualmente el mayor número se registró bajo bioestimulantes con 4 plantas rebrotadas. Si bien estas cifras sugieren un posible efecto positivo del bioestimulante en la estimulación del crecimiento vegetal y la activación de mecanismos de defensa inducida, mediados por la modulación de fitohormonas que pueden favorecer respuestas compensatorias como el rebrote (Harman *et al.* 2004), los resultados no permiten establecer una relación concluyente sobre la eficacia en este indicador al tratarse de una cifra no representativa.

La diferencia interespecífica se explica por las distintas estrategias regenerativas y ecología de estas especies arbóreas, ya que el roble al ser una especie caducifolia tiende a asignar recursos a estructuras subterráneas y a yemas axilares latentes, lo que le permite responder con mayor vigorosidad a disturbios que dañen su estructura aérea (Pollmann & Veblen 2004). En cambio, el coigüe, especie perennifolia, mantiene una inversión constante con hojas activas durante todo el año y presenta menor tendencia al rebrote como mecanismo de recuperación temprana. Además, se ha observado que especies con hojas persistentes priorizan la defensa estructural sobre la regeneración rápida, lo cual limita su capacidad de emitir brotes tras daño (Givnish 2002).

El presente estudio nos permitió conocer los resultados de cada tratamiento según la variable analizada, sin embargo, en la planificación de estrategias de restauración ecológica es fundamental conocer no solo la viabilidad de la plantación, sino que los costos asociados a aquello mediante un análisis de costo-efectividad.

El tratamiento con malla raschel demostró ser el más efectivo en términos ecológicos, con los valores más altos en supervivencia y tasa de crecimiento en largo, no obstante, su elevado costo por planta lo posicionó como el tratamiento menos eficiente desde el punto de vista económico. En contraste, el tratamiento casilla alcanza un balance óptimo entre desempeño ecológico y costo, logrando un alto índice de costo-efectividad, lo que lo convierte en la alternativa más viable para proyectos de restauración que cuentan con recursos limitados. El tratamiento con bioestimulante presentó un desempeño intermedio, con valores relativamente bajos, posiblemente debido al corto periodo de evaluación, mientras que el tratamiento control, aunque de menor costo, también mostró una menor respuesta en la mayoría de las variables.

Cabe destacar el tiempo invertido en la aplicación de cada tratamiento, pues el tratamiento con malla fue considerablemente más tardado que los demás, con un tiempo aproximado de 2 minutos de ejecución por planta en comparación con 30 segundos de ejecución de los otros tratamientos. Además, el T3 conlleva más logística que se debe tener en cuenta, como lo es la compra de materiales y la hechura de estos. Es por esto que aquel tratamiento se sitúa como el que demostró los mejores rendimientos, pero el más costoso en cuanto a dinero y tiempo.

Aunque el presente estudio constituye a un análisis preliminar de costo-efectividad de los distintos tratamientos evaluados, es importante recalcar que la integración formal de este tipo de análisis en restauración ecológica es limitada a nivel global, donde la mayoría de los proyectos de restauración no incorporan evaluaciones económicas exhaustivas, limitando así una planificación eficiente y una priorización de intervenciones costo-efectivas (Holl & Howarth 2000). Autores como Wortley *et al.* (2013) destacan la falta de estudios que integren atributos socioeconómicos junto a indicadores ecológicos, a pesar de que estos se vuelven fundamentales para sustentar la adopción de prácticas de restauración como herramientas viables de manejo. Bajo este contexto, el índice de costo efectividad generado en este estudio aporta evidencia práctica para la toma de decisiones en escenarios de recursos limitados, destacando el tratamiento casilla como el más balanceado entre desempeño y costo en las condiciones evaluadas.

5. CONCLUSIÓN

En conjunto, los resultados de este estudio evidencian que la respuesta de las plantas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus obliqua* a tratamientos silviculturales y bioestimulantes es multifactorial, modulada tanto por las características intrínsecas de las especies como por las condiciones edáficas, ambientales y operativas del sitio de plantación. *N. dombeyi* mostró una mayor capacidad de adaptabilidad y desempeño general en condiciones de campo, reflejando su carácter más generalista y su alta plasticidad ecológica.

Entre los tratamientos evaluados, la malla raschel muestra los mayores efectos positivos sobre la supervivencia y crecimiento en altura de las plantas, lo que confirma su utilidad como técnica de protección y mejora micro climática en etapas tempranas de establecimiento. Sin embargo, su elevado costo de implementación la posiciona como la alternativa de menor eficiencia económica en comparación con otros tratamientos. En este sentido, la técnica casilla destaca como la opción más costo-efectiva, al combinar un crecimiento moderado con altos niveles de supervivencia y un costo intermedio, lo que la hace recomendable para programas de restauración con recursos limitados.

La evaluación integrada de variables morfológicas, funcionales y operativas refuerza la importancia de un enfoque multidimensional en la planificación de estrategias de restauración. Este trabajo constituye así un aporte relevante al conocimiento operativo de la restauración ecológica en ambientes templados del sur de Chile, entregando evidencia empírica para optimizar la selección de técnicas de manejo en función de sus impactos ecológicos y económicos. Es clave ampliar este tipo de estudios incorporando mayor recopilación espacial y temporal, además de considerar nuevas combinaciones de tratamientos que potencien tanto el desempeño de las plantas como la eficiencia en la implementación de restauraciones a gran escala. Finalmente, es relevante incorporar variables funcionales y edáficas adicionales que permitan comprender en mayor profundidad los mecanismos detrás de la respuesta de las especies a los tratamientos evaluados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed M, Wagan S, Alam I, Hussain A, Ali Q, Saha S, Poudel T, Manghwar H, Liu F. 2024. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress* 11.
- Azarbad H, Junker R. 2024. Biological and experimental factors that define the effectiveness of microbial inoculation on plant traits: a meta-analysis. *ISME Commun* 4(1).
- Azpilicueta M, Gallo L, Pastorino M, Lozano L. 2011. Aspectos genéticos de la restauración ecológica del bosque nativo. Ejemplos de aplicación en la Región Andino-Patagónica. *INTA EEA Bariloche*.
- Bengough A, Bransby M, Hans J, McKenna S, Roberts T, Valentine T. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*
- Callaway R. 1995. Positive interactions among plants. *The Botanical Review* 61(4): 306–349.
- Canadell J, Jackson R, Ehleringer J, Mooney H, Sala O & Schulze E. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108(4): 583–595.
- Catterall C, Harrison D, Kanowski J. 2012. Can tropical rainforest regeneration be enhanced by planting trees?. *Biological Conservation* 143(9): 1832–1842.
- Chanway C, Shishido M, Nairn J, Jungwirth S, Markham J, Xiao G, Holl F. 2000. Endophytic colonization and field responses of hybrid spruce seedlings after inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria. *Forest Ecology and Management* 133(1-2): 81-88.
- Cinantya A, Manea A, Ossola A, Leishman M. 2023. Biostimulant application practices in Australian urban forestry. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 53(4): 1020–1030.
- CIREN. 2003. Estudio agrológico X Región: Descripciones de Suelos, Materiales y Símbolos. [Estudio Agrológico]. CIREN.
- CONAF. 2017. Avances y desafíos en la restauración de bosques nativos en Chile. Corporación Nacional Forestal.
- Cortina J, Peñuelas J, Puértolas J, Savé R, Vilagrosa A. 2006. Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: Estado actual de conocimientos. Madrid: Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- Donoso C, Escobar B, Pastorino M, Gallo L, Aguayo J. 2006. *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Bizzarri; Ciprés de la Cordillera, Len. En: Donoso, C. (ed.) Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia (Chile). pp. 36-53.

- Donoso C, González M, Lara A. 2014. Ecología Forestal. Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile. Ediciones UACH.
- Donoso E, Bustamante R, Carú M, Niemeyer H. 2008. Water deficit as a driver of the mutualistic relationship between the fungus *Trichoderma harzianum* and two wheat genotypes. *Bio Insumos Nativa*; Departamento de ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.
- Donoso E. 2021. Eficacia del producto Centeon Max (*Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*) WP como bioestimulante radicular en el cultivo de arándano Var. Biloxi en sustrato (fibra de coco). Bio Nativa Spa.
- Donoso P, Cabezas C, Lavanderos A, Donoso C. 1999. Desarrollo de renovales de coihue común (*Nothofagus dombeyi*) en la Cordillera de la Costa y de los Andes de la provincia de Valdivia en sus primeros 25 años. *Bosque* 20: 9-23.
- Donoso P, Soto D, Fuentes C. 2015. Differential growth rates through the seedling and sapling stages of two *Nothofagus* species underplanted at low-light environments in an Andean high-graded forest. *New Forests* 46: 5-6.
- Echeverría C, Newton A, Lara A, Rey J, Coomes D. 2007. Impactos de fragmentación forestal en la composición de especies y la estructura forestal en el paisaje templado del sur de Chile. *Ecología Global y Biogeografía* 16(4): 426-439.
- FAO. 2009. Guía para la Descripción de Suelos. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (4).
- Franklin K. 2008. Shade avoidance. *New Phytologist* 179(4): 930-944.
- Gann G, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson C, Jonson J, Hallett J, Eisenberg C, Guariguata M, Liu J. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27(S1): S1–S46.
- Gerding V, Thiers O, Schlatter J, Sanzana J. 2014. Suelos ñadi para una producción forestal sostenible: Principales problemas, causas y propuestas de solución. *Bosque Nativo* 53: 36-43.
- Givnish T. 2002. Adaptive Significance of Evergreen vs. Deciduous Leaves: Solving the Triple Paradox. *Silva Fennica* 36(3).
- Glick B. 2020. Beneficial Plant-Bacterial Interactions. *Springer Nature*.
- Grosse H. 1988. Crecimiento de plantaciones de Raulí y Roble bajo dosel en dependencia del grado de luminosidad y fertilización. *Ciencia e Investigación Forestal* 2(3).
- Grossnickle S, MacDonald J. 2018. Why seedlings grow: influence of plant attributes. *New Forests* 49: 1-34.
- González M, Donoso P. 2019. Efecto de mallas raschel de colores en el crecimiento de plántulas de *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus alpina* en vivero. *Bosque (Valdivia)* 40(3): 287-295.

- González-León Y, Ortega J, Anducho M, Mercado Y. 2022. *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: Características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 25: 1-14.
- Harman G, Howell C, Viterbo A, Chet I, Lorito M. 2004. *Trichoderma* species -opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature reviews Microbiology* 2(1): 43-56.
- Heinrich K, Ellies A. 1999. El Rol de la Física del Suelo en la Producción Agrícola. *Agro Sur* 27(1): 43–56.
- Hernández M. 2018. Conflicto socio ambiental derivado de mini hidroeléctricas en la comuna de Panguipulli, región de los ríos. Tesis Geografía. Santiago, Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 18p.
- Herrera C. 2014. Crecimiento de renovales de *Nothofagus dombeyi* y definición de sistemas silviculturales según productividad de sitio y manejo. Fondo de Investigación del Bosque Nativo.
- Holl K, Howarth R. 2000. Paying for Restoration. *Restoration Ecology* 8(3): 260-267.
- Kashyap P, Rai P, Srivastava A, Kumar S. 2017. *Trichoderma* for climate resilient agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*.
- Kleiman D, Aarssen L. 2007. The leaf size/number trade-off in trees. *Journal of Ecology* 95(2): 376–382.
- Kloepper J, Ryu C, Zhang S. 2004. Induced Systemic Resistance and Promotion of Plant Growth by *Bacillus spp.* *Phytopathology* 94 (11): 1259-66.
- Lambers H, Chapin F, Pons T. 2008. Plant physiological ecology. *Springer Science & Business Media*.
- Lara L, Zulueta R, Murillo B, Romero M, Rivas T, Hernandez L. 2020. Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum L.*) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Terra Latinoamericana* 38(3).
- Leung A, Garg A, Kumar R. 2018. Effects of soil structure and composition on plant root development. *Plant and Soil* 428(1): 1–19.
- Loewe-Muñoz V, Rodríguez C, López L. 1998. Monografía de roble *Nothofagus obliqua*. Santiago, Chile: CONAF: INFOR: FIA.
- Luebert F, Pliscoff P. 2017. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Segunda Edición. Editorial Universitaria 377 p.
- Martínez-Herrera E, Bravo V, Grez I, Vaswani S, Toro N, Yáñez M, Espinoza S, Abarca B, Faundez A, Quiroz I, Magni C. 2023. The Use of Mulch and Shading Improves the Survival of Sclerophyllous Species Established in Island Plots in Central Chile. *Ecology Science and Engineering* 13 (14).

- Mayr S, Sperry J. 2009. Freeze–thaw-induced embolism in *Pinus contorta*: centrifuge experiments validate the ‘thaw-expansion hypothesis’ but conflict with ultrasonic emission data. *New Phytologist* 185(4): 1016-1024.
- Meli P, Holl, K, Rey J, Jones H, Jones P, Montoya D, Mateos D. 2017. A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *Biological Conservation* 206: 163–171.
- Migunova V, Sasanelli N. 2021. Bacteria as Biocontrol Tool against Phytoparasitic Nematodes. *Plants* 10 (2).
- Ministerio del Medio Ambiente. 2018. Documento marco para la restauración ecológica.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2021. Plan nacional de restauración de paisajes 2021–2030.
- Meteochile. 2024. Informe Anual de Agua Caída. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaidaAnual/390006/2024>
- Meteochile. 2025. Informe Anual de Agua Caída. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaidaAnual/390006/2025>
- Meteochile. 2024. Temperatura Media Climatológica. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/temperaturaMediaAnual/390006/2024>
- Meteochile. 2025. Temperatura Media Climatológica. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/temperaturaMediaAnual/390006/2025>
- Meteochile. 2024. Informe Anual-Monitoreo de Heladas. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anualb/monitoreoHeladasEstacion/390006/2024>
- Meteochile. 2025. Informe Anual-Monitoreo de Heladas. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anualb/monitoreoHeladasEstacion/390006/2025>
- Meteochile. 2025. Informe Anual-Monitoreo de Olas de Calor (Diurna). Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anualb/olaDeCalorAnualEstacion/390006/2024>
- Meteochile. 2025. Informe Anual-Monitoreo de Olas de Calor (Diurna). Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anualb/olaDeCalorAnualEstacion/390006/2025>
- Müller-Using S, Martin M, Bahamondez C, Uribe J. 2014. Antecedentes técnicos del tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe. CONAF – INFOR.
- Municipalidad de Panguipulli. 2013. Plan de Desarrollo Comunal 2013-2017. Informe Final.

- Niinemets Ü. 2001. Global-scale climatic controls of leaf dry mass per area, density, and thickness in trees and shrubs. *Ecology*.
- Oren R, Sperry J, Katul G, Pataki D, Ewers B, Phillips N, Schäfer K. 1999. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant, Cell and Environment* 22: 1515-1526.
- Padilla F, Pugnaire F. 2007. Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology* 21(3): 489–495.
- Pallardy S. 2008. Physiology of woody plants (3rd ed.). *Academic Press*.
- Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Cornelissen J. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61(3): 167–234.
- Piper F. 2011. Drought induces opposite changes in the concentration of non-structural carbohydrates of two evergreen *Nothofagus* species of differential drought resistance. *Annals of Forest Science* 68: 415-424.
- Piper F, Corcuera L, Alberdi M, Lusk C. 2007. Differential photosynthetic and survival responses to soil drought in two evergreen *Nothofagus* species. *Annals of Forest Science* 64: 447-452.
- Pollmann W, Veblen T. 2004. *Nothofagus* regeneration dynamics in South-central Chile: a test of a general model. *Ecological Monographs* 74(4): 615-634.
- Poorter H, Niinemets Ü, Poorter L, Wright I, Villar R. 2009. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist* 182(3): 565-588.
- Reyes-Díaz M, Alberdi M, Piper F, Bravo L, Corcuera L. 2005. Low temperature responses of *Nothofagus dombeyi* and *Nothofagus nitida*, two evergreen species from south central Chile. *Tree Physiology* 25: 1389-1398.
- Reyes J, Thiers O, Gerding V. 2014. Characterization of soil properties of *Nothofagus* spp. forest with and without scarification in the Andean region of Southern Chile. *Journal of soil science and plant nutrition* 14(1).
- Reis G, Martínez-Burgos W, Pozzan R, Pastrana Y, Ocán-Torres D, Fonseca P, Rodrigues C, Lima J, Scapini T, Karp S, Soccol C. 2024. Comprehensive Review of Microbial Inoculants: Agricultural Applications, Technology Trends in Patents, and Regulatory Frameworks. *Sustainability* 16(19) 8720.
- Rigobelo E, Alves de Andrade L, Barbosa C, Teciano E, Ramos L, Amoroso L, Pinheiro D, Nicodemo D, Babalola O, Quecine M, Mondin M, Desoignies N. 2024. Effects of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* on the root and soil microbiomes of the soybean plant INTACTA RR2 PRO. *Frontiers in Plant Science* 15.

- Riquelme-Buitano T, Ojeda P, Donoso P. 2023. Comparación de crecimiento de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en plantaciones puras y mixta en la depresión intermedia de la Región de Los Ríos, Chile. *Bosque* 44(1): 263-272.
- Rouphael Y, Colla G. 2020. Bioestimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science* 11.
- Sakai A, Larcher W. 1987. Frost Survival of Plants. Responses and Adaptation to Freezing Stress. *Ecological Studies* 62.
- Santacruz-García A, García M, Gómez A, Ewens M, Yonny M, Villalba G, Nazareno M. 2022. Biostimulants as forest protection agents: Do these products have an effect against abiotic stress on a forest native species? Aspects to elucidate their action mechanisms. *Forest Ecology and Management* 522.
- Santoyo G, Orozco-Mosqueda M, Govindappa M. 2021. Mechanisms of plant growth promotion by beneficial microorganisms: Recent findings and future challenges. *Plant and Soil* 461: 1–37.
- Sarricolea P, Herrera M, Meseguer O. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of maps* 13(2): 66-73.
- Schenk H & Jackson R. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology* 90(3): 480–494.
- Schlatter V, Gerding V, Grez R. 2003. Manual para el reconocimiento de suelos. Pautas e indicaciones para el reconocimiento de suelos y su evaluación en terreno. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales.
- SER. 2004. Society of Ecological Restoration (SER), International Science & Policy, Working Group. The SER International Primer on Ecological Restoration.
- Shekhar V, Stockle D, Thellmann M, Vermeer J. 2018. The role of plant root systems in evolutionary adaptation. *PubMed* 131: 55-80.
- Smith H, Whitelam G. 1997. The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell and Environment* 20: 840-844.
- Smith-Ramírez C, Becerra P, Vásquez I, Miranda A, Seguel O. 2013. Implementación de un estudio a largo plazo del potencial de restauración pasiva del bosque esclerófilo de Chile central. Corporación Nacional Forestal.
- Sood M, Kapoor D, Kumar V, Sheteiwy M, Ramakrishnan S, Landi M, Araniti M, Sharma A. 2020. *Trichoderma*: The “Secrets” of a multitalented biocontrol agent. *Plants* (9)762.
- Sotomayor A, García E, Valdebenito G. 2001. Manual de plantaciones forestales para pequeñas propiedades forestales. Manual 30. INFOR.
- Wortley L, Hero J, Howes M. 2013. Evaluating Ecological Restoration Success: A Review of the Literature. *Restoration Ecology* 21(5): 537–543.

Yakhin O, Lubyantsev A, Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science* 7, 2049.

Zhang N, Wang Z, Shao J, Xu Z, Liu Y, Xun W, Miao Y, Shen Q, Zhang R. 2023. Biocontrol mechanisms of *Bacillus*: Improving the efficiency of green agriculture. *Microbial Biotechnology* 16(12): 2250-2263.

ANEXOS

Anexo 1. Diseño espacial del ensayo experimental



Anexo 2. Aplicación de malla raschel alrededor de la planta, correspondiente al tratamiento 3



Anexo 3. Puntos de muestreo análisis de suelo



Anexo 4. Fotografías de la plantación en el área de estudio.



Anexo 5. Estero Mañedehue.



Anexo 6. Resumen general de los resultados.

a) Resumen de los resultados de las variables de los distintos tratamientos aplicados a *Nothofagus dombeyi* (coigüe). **b)** Resumen de los resultados de las variables de los distintos tratamientos aplicados a *Nothofagus obliqua* (roble).

a)

Tratamiento	Superviv	L P1	L P2	L P3	DAC P1	DAC P2	DAC P3	Hjs P1	Hjs P2	Hjs P3	SLA P1	SLA P2	SLA P3	Rebrt	Herbv
T1	56	64.79	56.08	63.29	0.54	0.52	0.63	157.36	122.57	222.63	86.82	83.08	81.01	4	11
T2	59	45.04	42.62	53.22	0.39	0.40	0.51	80.57	104.69	149.53	99.76	97.82	89.71	2	11
T0	53	36.03	34.09	44.34	0.33	0.34	0.42	55.26	60.19	98.26	92.98	88.26	81.29	2	8
T3	67	34.86	34.09	49.76	0.32	0.35	0.44	49.79	73.21	116.28	99.83	101.21	102.22	2	6
Total general	235	45.15	41.27	52.63	0.40	0.40	0.50	85.67	88.92	145.92	94.80	93.17	89.39	10.00	36.00

b)

Tratamiento	Superviv	L P1	L P2	L P3	DAC P1	DAC P2	DAC P3	Hjs P1	Hjs P2	Hjs P3	Rebrt	Herbv
T1	58	84.49	78.21	83.39	0.71	0.69	0.82	89.77	141.76	98.45	16	5
T2	50	48.45	49.11	53.46	0.52	0.50	0.62	70.73	81.98	91.76	12	10
T0	48	48.66	46.40	54.58	0.54	0.51	0.68	74.64	97.45	78.81	8	14
T3	47	56.55	55.89	66.47	0.48	0.48	0.63	87.10	106.23	93.23	4	2
Total general	203	59.46	57.83	65.38	0.56	0.55	0.70	80.54	107.64	90.95	40.00	31.00

T0 = tratamiento control; **T1**= tratamiento con bioestimulante; **T2** = tratamiento casilla; **T3** = tratamiento con malla raschel.

P1 corresponde a los datos registrados en el primero periodo de evaluación, siendo este en agosto de 2024.
P2 corresponde a los datos registrados en el segundo periodo de evaluación, siendo este en noviembre de 2024.
P3 corresponde a los datos registrados en el tercer y último periodo de evaluación, siendo este en marzo de 2025.
L corresponde al largo en centímetros.
DAC corresponde al diámetro a la altura del cuello en centímetros.
Hjs corresponde al número de hojas registradas por planta.
SLA corresponde al área foliar específica (cm^2/g).
Rebrt corresponde al rebrote observado en las plantas durante todo el tiempo de evaluación.
Herbv corresponde a la herbivoría observada en las plantas durante todo el tiempo de evaluación.