



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA VEGETAL

**EFFECTO DE PRODUCTOS BIOLÓGICOS COMERCIALES EN LA
PROMOCIÓN DE CRECIMIENTO Y SOBREVIVENCIA DE PLANTAS DE**

Pinus radiata

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniera en Biotecnología
Vegetal

POR Mayte Anaís González Baeza

Profesor Guía: Dr. Eugenio Alfredo Sanfuentes Von Stowasser

Septiembre, 2024

Concepción, Chile

© 2024

Mayte Anaís González Baeza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

EFFECTO DE PRODUCTOS BIOLÓGICOS COMERCIALES EN LA
PROMOCIÓN DE CRECIMIENTO Y SOBREVIVENCIA DE PLANTAS DE *Pinus*
radiata

Profesor Guía



Eugenio Sanfuentes Von Stowasser
Profesor Titular
Ingeniero Forestal, Dr.

Profesora Guía



Valeria Arriagada González
Colaboradora Académica
Bioingeniera, MsC.

DEDICATORIA

A mis padres.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Dosis recomendada de aplicación por los fabricantes de los bioproductos Vitanica RZ, Trichonativa y prototipo M3.....	10
Tabla 5.2. Diseño del experimento factorial 2x4x4, con los dos tipos de suelo (arenoso y granítico) y cuatro tratamientos.....	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1 Mediciones de la altura desde el cuello al ápice, indicado por las flechas de las plántulas de <i>Pinus radiata</i> con huincha de medir (cm).....	11
Figura 6.1 Mortalidad en plántulas, indicadas por las flechas, de <i>Pinus radiata</i> (damping-off) en suelo arenoso (A) y granítico (B).	15
Figura 6.2 Emergencia de plántulas de <i>Pinus radiata</i> (%) por tratamiento y tipo de suelo. Columnas seguidas de letras iguales indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p<0,001$).....	15
Figura 6.3 Supervivencia de plántulas de <i>Pinus radiata</i> (%) en suelo arenoso. Barras seguidas de letras iguales, indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p<0,05$).....	16
Figura 6.4 Evolución de la mortalidad de plántulas de <i>Pinus radiata</i> (%) para los tratamientos con productos biológicos prototipo M3, Vitanica RZ y Trichonativa y el control, en suelo arenoso (línea continua) y granítico (línea discontinua). Tratamientos T0 y T4 (ADE), T1 y T5 (M3), T2 y T6 (Vitanica RZ), T3 y T7 (Trichonativa).....	16
Figura 6.5 Supervivencia de plántulas de <i>Pinus radiata</i> (%) por tratamiento en suelo granítico. Barras seguidas de letras iguales, indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p<0,05$)	17
Figura 6.6 Hongos y oomicetos observados en plántulas de <i>Pinus radiata</i> con síntomas de damping-off. Esporas de <i>Fusarium</i> (A) e hifas cenocíticas del <i>Pythium</i> (B) observadas bajo microscopio (x40).....	17
Figura 6.7 Biomasa total de plantas de <i>Pinus radiata</i> en el suelo arenoso (A) y granítico (B), biomasa aérea en suelo arenoso (C) y granítico (D), biomasa de raíz principal en suelo arenoso (E) y granítico (F) y longitud de raíces en suelo arenoso (G) y granítico (H), para los tratamientos con productos biológicos y control. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p<0,05$).	19

Tabla de contenido

RESUMEN	viii
ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	3
II. HIPÓTESIS.....	7
III. OBJETIVO GENERAL.....	7
IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
V. METODOLOGÍA	8
VI. RESULTADOS.....	14
VII. DISCUSIÓN	20
VIII. CONCLUSIONES.....	25
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	26
X. APÉNDICE	29

RESUMEN

El *Pinus radiata* es la especie que cuenta con la mayor superficie de plantaciones en Chile, lo que ha generado la necesidad de proporcionar anualmente millones de plantas a la forestación o reforestación. Durante el proceso de producción de plantas de *P. radiata en vivero*, existen una serie de amenazas, como lo son las enfermedades, que provocan mortalidad y descalificación de plantas, reduciendo la capacidad de cumplir con los requerimientos de plantación. Otro aspecto relevante en la producción en vivero es el de proporcionar plantas de calidad y que les permita crecer rápidamente en el primer año de la plantación. Tanto el control de enfermedades como las fertilizaciones en viveros se han basado en el uso de productos químicos, junto con aplicar medidas de culturales, sin embargo, es imprescindible explorar el uso de productos alternativos, de origen biológico, no solo por las normativas ambientales establecidas, sino también por su capacidad para ofrecer soluciones más sostenibles y reducir los impactos negativos al medioambiente, promoviendo la salud del suelo y la biodiversidad. En este estudio se evaluó el efecto de tres bioproductos: prototipo M3, Trichonativa y Vitanica RZ, en la supervivencia y crecimiento de plantas de *P. radiata*. El experimento se llevó a cabo en suelos arenosos y graníticos, en condiciones de invernadero. Fueron

aplicados los bioproductos mediante inmersión de semillas y aspersión al suelo. Las evaluaciones consistieron en registrar la emergencia de plántulas, mortalidad, altura y biomasa de las plantas. Los resultados mostraron que la emergencia de plántulas es dependiente de los tratamientos y tipos de suelo. La aplicación de Vitanica RZ incrementó significativamente la biomasa total y aérea de las plantas en suelo arenoso, aunque presentó una mortalidad del 53% debido a patógenos. Trichonativa demostró un aumento significativo en la biomasa total y longitud de raíces, en suelo arenoso y biomasa aérea en suelo arenoso y granítico. El uso de estos bioproductos comerciales mostraron potencial para mejorar el crecimiento de plántulas de pino en suelos no esterilizados, destacando la importancia de estos microorganismos en la promoción del crecimiento vegetal en condiciones naturales. Este estudio proporciona información para el desarrollo de estrategias de manejo forestal sostenible, con el potencial de incrementar el crecimiento en plantaciones de *P.radiata*.

Palabras claves: damping-off, biotecnología forestal, bioproductos, *B. amyloliquefaciens.*, *Trichoderma harzianum*,

ABSTRACT

Pinus radiata is the species with the largest plantation area in Chile, which has created the need to provide millions of plants annually for afforestation or reforestation. During the production process of *P. radiata* plants in nurseries, there are several threats, such as diseases, that cause plant mortality and disqualification, reducing the ability to meet planting requirements. Another relevant aspect of nursery production is to provide quality plants that can grow quickly during the first year of planting. Both disease control and fertilization in nurseries have relied on the use of chemical products, along with the application of cultural practices. However, it is essential to explore the use of alternative, biological products, not only due to established environmental regulations but also because of their ability to offer more sustainable solutions and reduce negative impacts on the environment, promoting soil health and biodiversity. This study evaluated the effect of three bioproducts: prototype M3, Trichonativa, and Vitánica RZ, on the survival and growth of *P. radiata* plants. The experiment was conducted in sandy and granitic soils, under greenhouse conditions. The bioproducts were applied by seed immersion and soil spraying. The evaluations included seedling emergence, mortality, plant height, and biomass. The results showed that seedling emergence depended on the treatments and soil types. The application of Vitánica RZ significantly increased the total and aerial biomass of the plants in sandy soil, although it had a 53% mortality rate due to

pathogens. *Trichonativa* showed a significant increase in total biomass and root length in sandy soil, and in aerial biomass in both sandy and granitic soils. The use of these commercial bioproducts demonstrated potential to improve pine seedling growth in non-sterilized soils, highlighting the importance of these microorganisms in promoting plant growth under natural conditions. This study provides information for the development of sustainable forest management strategies, with the potential to increase growth in *P. radiata* plantations.

Keywords: damping-off, forest biotechnology, bioproducts, *B. amyloliquefaciens*, *Trichoderma harzianum*.

I. INTRODUCCIÓN

Pinus radiata D. Don, conocido como pino radiata o pino de Monterrey, su origen en Chile se remonta a 1887, cuando se realizó la primera plantación en el cerro Caracol de Concepción (González 1987). Desde ese entonces, la especie se encuentra distribuida ampliamente, desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Lagos, representando el 56% del total de las plantaciones forestales (Büchner, 2018).

Diversos factores han influido en la gradual reducción de la superficie plantada, como fue el término de los incentivos estatales en 2012, reduciendo las tasas de forestación a niveles mínimos, alcanzando solo el 1,1% de las plantaciones el año 2022 (INFOR, 2023). Además, ha incidido una mayor presión por el uso del suelo para el desarrollo de proyectos inmobiliarios, cambios de especies en plantaciones, reconversión de plantaciones a bosque nativo, y menores crecimientos de la especie en ciertas zonas, posiblemente relacionados con los efectos de la prolongada sequía en la zona central (Büchner *et al.* 2021). Además, estudios recientes indican que la actividad humana y cambios en el uso del suelo han afectado la magnitud de los incendios y sequías, contribuyendo al declive y mortalidad de la vegetación forestal (González, 2020). Como consecuencia, la superficie de plantaciones de *P. radiata* disminuyó en el periodo 2011 a 2020, de 1,48 a 1,28 millones de hectáreas,

representando una reducción del 12,7% de la superficie plantada (INFOR, 2022).

En este contexto, se busca aumentar la producción y reducir el tiempo de crecimiento de la especie para optimizar el uso del suelo. Esto también ayudaría a reducir la vulnerabilidad ante eventos adversos previamente descritos, asegurando una producción eficiente y sostenible frente a las cambiantes condiciones ambientales. Una alternativa que está siendo cada vez más implementada en los viveros forestales es la utilización de productos biológicos especialmente aquellos que en su formulación contienen microorganismos promotores de crecimiento. Entre estos, tal vez los más conocidos son las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), que corresponden a bacterias benéficas, que pueden aumentar la disponibilidad de nutrientes para la planta en la rizosfera, mediante la fijación de nitrógeno y la solubilización de fósforo, entre otros (Muthukumar y Udaiyan 2006). Además, se han usado PGPR para biorremediación de suelos contaminados con buenos resultados (Zhuang, 2007), por ejemplo, rizobacterias que aplicadas a las semillas han incrementado la biomasa en plantas de *Pinus sylvestris* y *Betula pendula* (Egamberdiyeva, 2003).

Otro grupo con efecto promotor de crecimiento, son los hongos micorrícicos vasculares (HMA) organismos del suelo que viven simbióticamente con la mayoría de las plantas aportándole beneficios como la asimilación de nutrientes

de baja disponibilidad o de poca movilidad en el suelo, evitando la acción de microorganismos patógenos, consecuentemente, aumentando el crecimiento de la planta (Barrera, 2009).

Un tercer conjunto de microorganismos promotores de crecimiento está conformado por los hongos no micorrícicos (Rabeendran 2000), como es el caso de las especies de *Trichoderma*, especialmente mediante el uso de *Trichoderma harzianum*. Esta es una especie cosmopolita con una gran capacidad de adaptación y producción de diversos metabolitos, incluyendo compuestos promotores del crecimiento vegetal y volátiles de interés biotecnológico y ambiental (Hernández-Melchor *et al.* 2019). *Trichoderma harzianum* también ha sido utilizado en viveros forestales como agente de biocontrol de hongos patógenos de suelo, a través de varios mecanismos de acción, tales como competencia por substrato, micoparasitismo, antibiosis, desactivación de enzimas asociadas a patogenicidad, resistencia sistémica inducida, entre otros (Infante *et al.* 2009). Además de sus propiedades de biocontrol, se reconoce su potencial como promotor de crecimiento.

En combinación con la bacteria *Bacillus subtilis*, se demostró el efecto de *T. harzianum* en promover el crecimiento de plantas de *Eucalyptus grandis* en México (García-Díaz *et al.* 2019), en plantas de *P. radiata* en Chile (Donoso *et al.* 2008), y en plantas de *E. globulus* en Argentina (Penon, 1997).

A pesar de los avances en la utilización de microorganismos promotores de crecimiento en la silvicultura, sigue siendo escasa la investigación que demuestre de manera exhaustiva el rol de los hongos en la promoción del crecimiento y el control de patógenos en especies forestales, particularmente durante la fase de producción de plantas. En comparación con la abundante investigación disponible para las rizobacterias (Moraga, 2017), los estudios sobre el impacto de estos agentes en especies forestales son limitados, particularmente en Chile, donde la mayoría de las investigaciones se han enfocado en especies agrícolas. Esta investigación pretende contribuir al conocimiento sobre el potencial de microorganismos en especies forestales de interés comercial como *P. radiata*.

II. HIPÓTESIS

Los bioproductos M3, Trichonativa y Vitanica RZ aumentan la sobrevivencia y promueven el crecimiento en plantas de *Pinus radiata*.

III. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de los bioproductos prototipo M3, Trichonativa y Vitanica RZ en la sobrevivencia y promoción de crecimiento en plantas de *Pinus radiata*.

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.1 Establecer el efecto de los bioproductos en la sobrevivencia de plantas de *P. radiata*.

4.2 Determinar el efecto de los bioproductos en el crecimiento y biomasa de plantas de *P. radiata*.

V. METODOLOGÍA

5.1 Antecedentes generales

El estudio se realizó en el invernadero y Laboratorio de Patología Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, Chile.

5.2 Descripción de material vegetal y bioproductos

Fueron empleadas semillas de *P. radiata* facilitadas por el Centro de Semillas de CONAF. Antes del ensayo las semillas fueron estratificadas, sumergiéndolas en agua corriente por 48 h y posteriormente refrigeradas durante cuatro semanas a 2°C (Godínez Álvarez, 2000).

En el estudio fueron probados tres bioproductos, los que son descritos a continuación: a) Trichonativa®, biofungicida de la empresa chilena BioInsumos Nativa SpA, formulado con las tres cepas de *T. harzianum*, *T. virens* y *T. parceramosum*. b) Vitanica RZ, de la empresa polaca Compo Expert y que corresponde a un fertilizante líquido enriquecido con extracto de algas marinas y *B. amyloliquefaciens*, y c) prototipo M3, biofungicida desarrollado en el Laboratorio de Patología Forestal de la Universidad de Concepción, para el

control de *Fusarium circinatum*, formulado con los hongos *Trichoderma harzanium*, *Gliocladium penicillioides* y *Bionectria ochroleuca*.

En el ensayo se utilizaron dos tipos de suelo, a) suelo arenoso, obtenido desde el Vivero Carlos Douglas, perteneciente a Forestal Mininco SA y b) suelo granítico, colectado desde la plantación de *Eucalyptus globulus* localizada en el predio La Cantera y El Guindo. En ambos casos la muestra compuesta de suelo obtenida hasta los primeros 15 cm de profundidad.

5.3 Descripción del ensayo

Un día antes de la siembra, los bioproductos fueron aplicados mediante tratamiento a las semillas de *P. radiata*, que consistió en inmersión de las semillas durante 30 min, en dosis recomendadas por fabricantes (Tabla 5.1). Inmediatamente después de la siembra se realizó una aplicación de los bioproductos mediante aspersión al suelo (300 ml por caja), de acuerdo con las dosis indicadas previamente para la inmersión de semillas. Una segunda aplicación se realizó después del inicio de la emergencia de las plántulas, aproximadamente 25 días después de la siembra. El riego se efectuó cada dos días, llevando el suelo aproximadamente a capacidad de campo. El ensayo tuvo una duración de 90 días desde la siembra.

Tabla 5.1. Dosis recomendada de aplicación por los fabricantes de los bioproductos Vitanica RZ, Trichonativa y prototipo M3

Bioproducto	Dosis recomendada
Vitanica RZ	25 ml/L de agua (Solución al 2,5%)
Trichonativa	5 ml/L de agua.
Prototipo M3	500 ml/L de agua (cepa 1) 250 ml/L de agua (cepa 2 y 3)

5.4 Evaluaciones y Diseño experimental

Durante la duración del ensayo, se registró semanalmente la emergencia y mortalidad de plántulas (damping-off). Para determinar los agentes causales, las plantas muertas fueron procesadas mediante cultivo en agua destilada estéril (ADE) en placas de Petri, durante 2-5 días, a temperatura ambiente en laboratorio (aproximadamente 18-19°C). El micelio desarrollado desde las plántulas en cultivo en ADE fue observado mediante microscopio de luz (x10 y x40) para determinar la presencia de estructuras somáticas y sexuales que permitan identificar a nivel de género los hongos u oomicetos.

Al final del ensayo, se registró el número de plantas de *P. radiata* que sobrevivieron, obteniéndose el porcentaje de sobrevivencia (PS), el cual consistió en contabilizar cada una de las plántulas emergidas hasta el último día de la evaluación y el resultado se obtiene según la siguiente fórmula:

$$\%PS = \frac{N^{\circ} \text{ plántulas en el último conteo}}{N^{\circ} \text{ de plántulas emergidas}} \times 100$$

Con las plantas que sobrevivieron al final del ensayo, se evaluó la altura de las plantas con regla milimétrica (cm), desde el cuello de la raíz hasta el ápice (Grossnickle *et al*, 1996). Para la evaluación de la biomasa, las plantas se extrajeron cuidadosamente desde los contenedores para evitar pérdida de raíces, posteriormente se lavaron con agua corriente hasta que estuvieran libres de partículas de sustrato, después, se procedió a pesar separadamente las raíces y la parte aérea, empleando balanza analítica (precisión 0,01 g) obteniéndose el peso fresco. Luego, las porciones de las plantas se secaron en estufa a 60°C por 48 h, hasta obtener peso seco constante. Antes del secado, las plántulas se extendieron en una superficie plana y oscura para realizar las mediciones y fotografiar (Figura 5.1).



Figura 5.1 Mediciones de la altura desde el cuello al ápice, indicado por las flechas de las plántulas de *Pinus radiata* con huincha de medir (cm).

El ensayo se realizó siguiendo un experimento factorial 2x4x4, consistentes en dos tipos de suelo (arenoso y granítico), tres tratamientos de bioproductos y un control absoluto, consiste en la inmersión de semillas y aplicación al suelo de agua destilada estéril (ADE) (Tabla 5.2). Cada tratamiento tenía cuatro repeticiones y la unidad experimental correspondió a la siembra de 24 semillas en una caja plástica transparente de 4,7 L conteniendo 300 g de suelo.

Tabla 5.2. Diseño del experimento factorial 2x4x4, con los dos tipos de suelo (arenoso y granítico) y cuatro tratamientos

Tipo de suelo	Tratamiento
Suelo arenoso	T0 (ADE)
	T1 (M3)
	T2 (Vitanica RZ)
	T3 (Trichonativa)
Suelo granítico	T4 (ADE)
	T5 (M3)
	T6 (Vitanica RZ)
	T7 (Trichonativa)

2.5 Análisis de datos

Para el análisis estadístico, se examinaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza u homocedasticidad dentro de los grupos mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene test, respectivamente. Las variables fueron sometidas a ANOVA de dos vías para evaluar la existencia de interacción significativa entre los factores suelo-tratamiento. En caso de detectar interacción, se aplicó un ANOVA de una vía y las medias se compararon utilizando la prueba de Tukey. Las variables que no cumplieron el supuesto de homocedasticidad se analizaron a través de ANOVA Welch y las medias se compararon utilizando la prueba de Games Howell. Los análisis se realizaron utilizando el software de R e Infostat con un nivel de significación de 0,05.

VI. RESULTADOS

La emergencia de las plantas de *P. radiata* comenzó durante la tercera semana posterior a la siembra. La mortalidad de plántulas, con síntomas correspondientes a damping-off, se observó durante la primera semana tras la emergencia (Figura 6.1). En el análisis de emergencia de plántulas no se obtuvo interacción entre suelo-tratamiento ($p=0,479$). Todos los tratamientos tuvieron una emergencia de plántulas igual a los controles, que fluctuó entre 89,6% y 94,8% para suelo arenoso y 77,1% y 82,3% en suelo granítico (Figura 6.2). En cuanto a la sobrevivencia, se constató interacción suelo-tratamiento ($p=0,0061$). En el suelo arenoso, los tratamientos M3 (98,6%) y Trichonativa (98,6%) fueron igual al control (100%) (Figuras 6.3 y 6.4), observándose una reducción significativa de la sobrevivencia en el tratamiento con Vitanica RZ (47,4%). Con este último producto, una de las repeticiones presentó 100% de mortalidad, asociado a una colonización de *Fusarium spp.* en todas las plántulas analizadas. En el suelo granítico, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos respecto al control (Figura 6.5). Entre los hongos asociados al damping-off, se detectaron hongos y oomicetos de los géneros *Fusarium* y *Pythium*, respectivamente (Figura 6.6), los que podrían tener un rol como patógenos en plántulas de *P. radiata*.

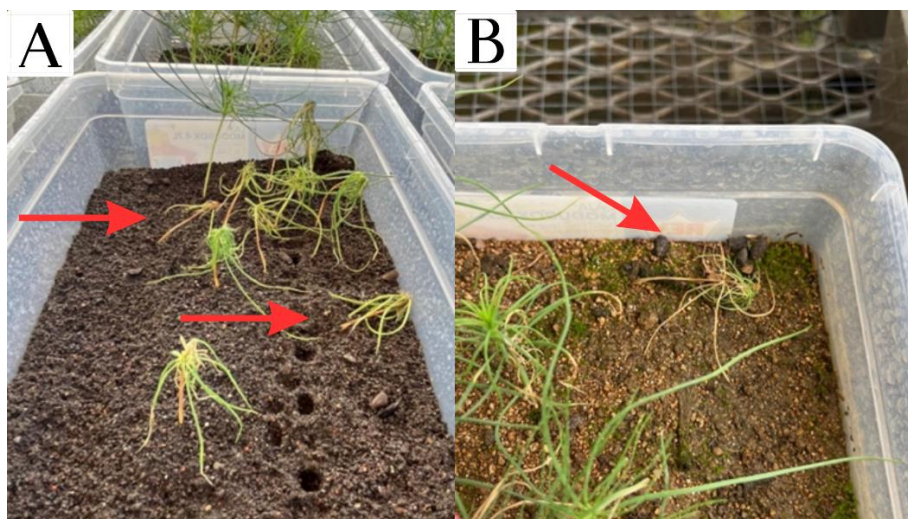


Figura 6.1 Mortalidad en plántulas, indicadas por las flechas, de *Pinus radiata* (damping-off) en suelo arenoso (A) y granítico (B).

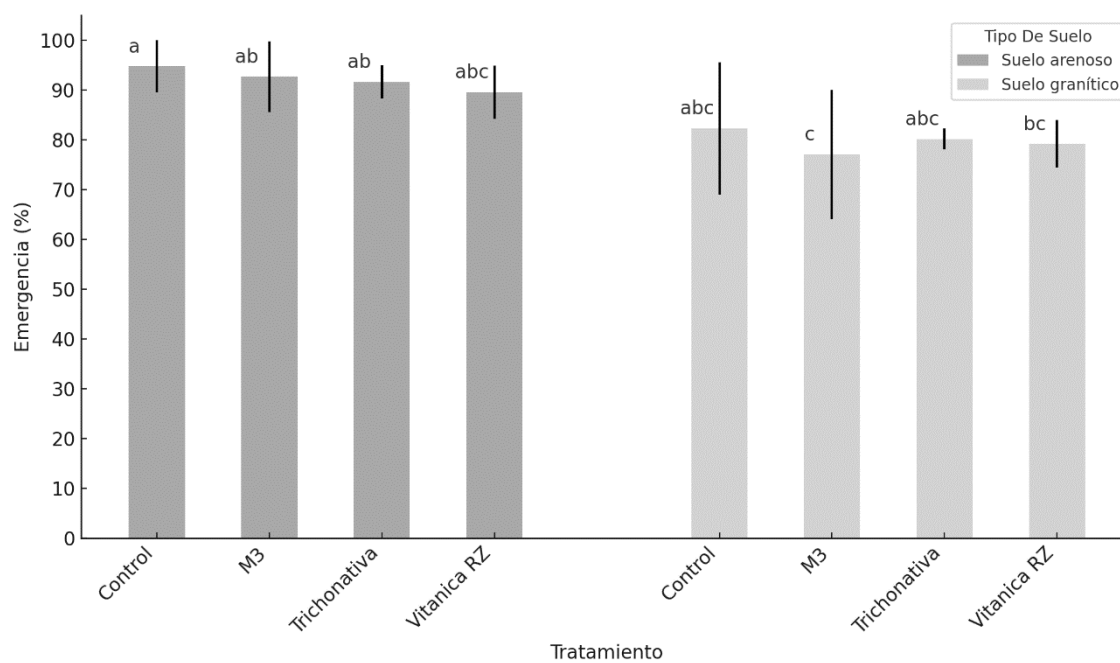


Figura 6.2 Emergencia de plántulas de *Pinus radiata* (%) por tratamiento y tipo de suelo. Columnas seguidas de letras iguales indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p < 0,001$).

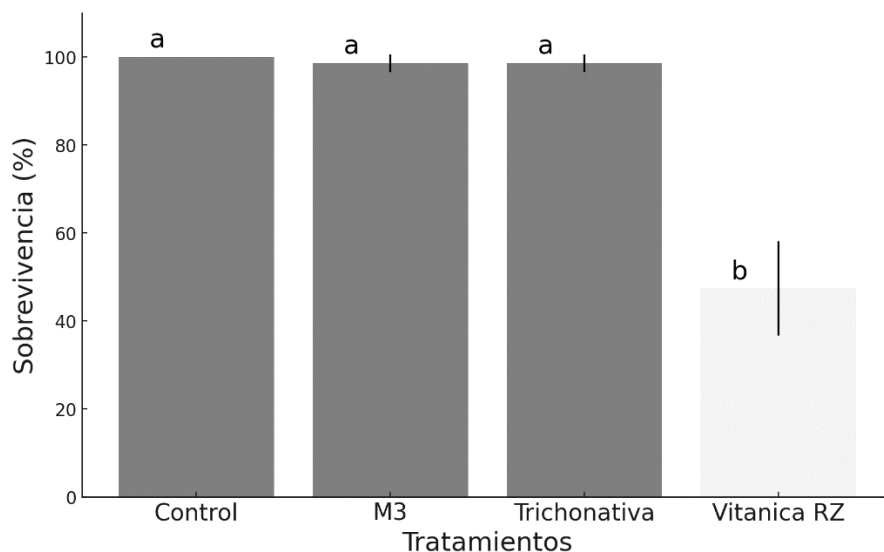


Figura 6.3 Supervivencia de plántulas de *Pinus radiata* (%) en suelo arenoso. Barras seguidas de letras iguales, indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$)

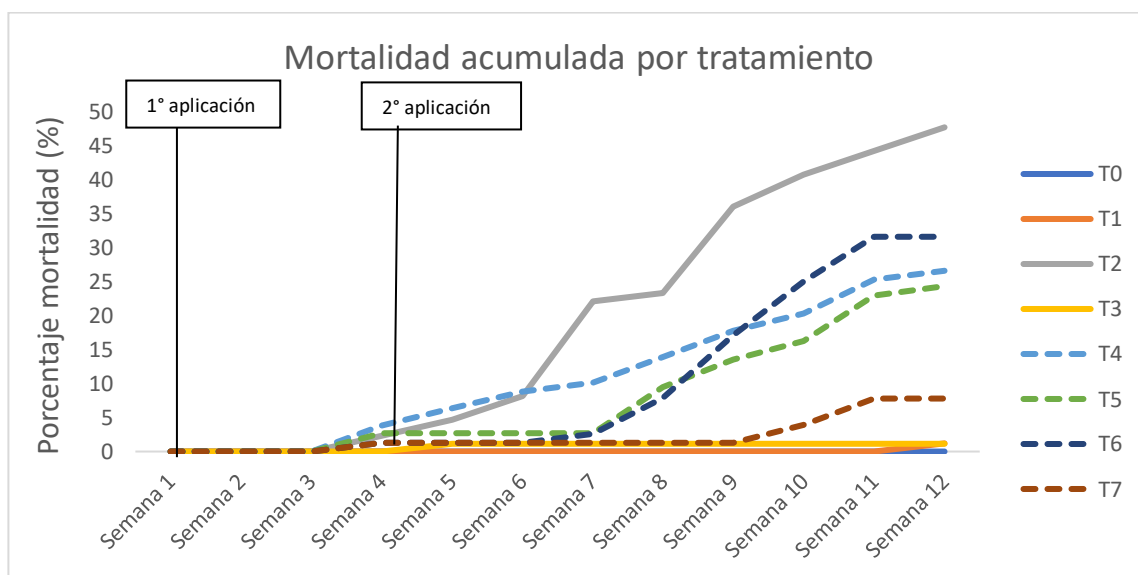


Figura 6.4 Evolución de la mortalidad de plántulas de *Pinus radiata* (%) para los tratamientos con productos biológicos prototipo M3, Vitanica RZ y Trichonativa y el control, en suelo arenoso (línea continua) y granítico (línea discontinua). Tratamientos T0 y T4 (ADE), T1 y T5 (M3), T2 y T6 (Vitanica RZ), T3 y T7 (Trichonativa).

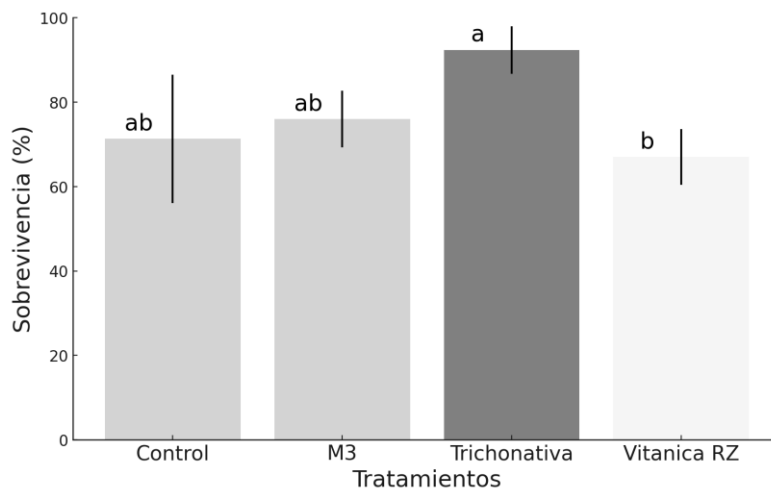


Figura 6.5 Supervivencia de plántulas de *Pinus radiata* (%) por tratamiento en suelo granítico. Barras seguidas de letras iguales, indican ausencia de diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$)

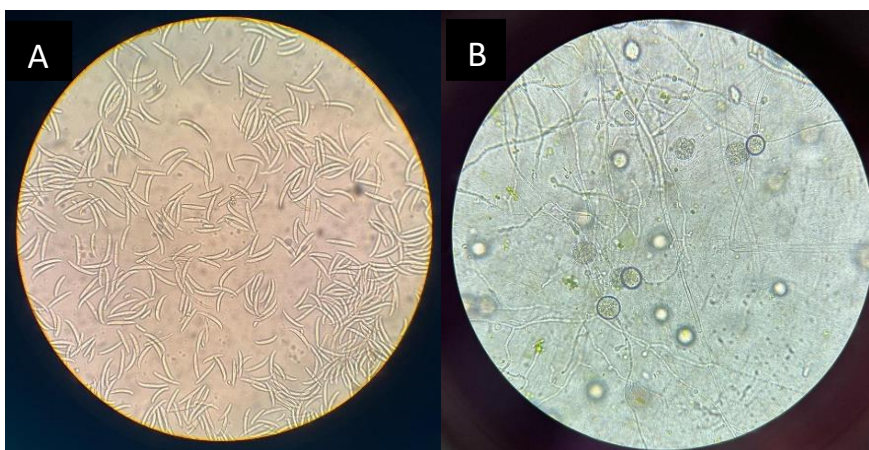


Figura 6.6 Hongos y oomicetos observados en plántulas de *Pinus radiata* con síntomas de damping-off. Esporas de *Fusarium* (A) e hifas cenocíticas del *Pythium* (B) observadas bajo microscopio (x40).

Para la biomasa total de plantas, en el suelo arenoso, la aplicación de los productos de Vitanica RZ y Trichonativa incrementó la biomasa de las plantas comparadas con el control y M3 (Figura 6.7.A). Sin embargo, en el suelo

granítico, para esta misma variable no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 6.7.B).

Para la biomasa aérea, la aplicación en suelo arenoso de Vitanica RZ las plantas de *P. radiata* presentaron una mayor biomasa comparada con los otros productos y el control (Figura 6.7.C); sin embargo, en el suelo granítico los bioproductos no presentaron efecto en comparación al tratamiento control (Figura 6.7.D)

En el análisis de biomasa de raíces, tanto en el suelo arenoso como granítico (Figura 6.7.E), se constató un efecto significativo de Trichonativa en incrementar la biomasa comparada con los controles (Figura 6.7.F). Sin embargo, se observó una menor longitud de raíz principal en las plantas en la aplicación de M3 en el suelo arenoso.

En el análisis de altura, no se constató interacción significativa entre suelo x tratamiento ($p=0,872$), por lo tanto, no hay efecto de los tratamientos en los tipos de suelo.

En la longitud de la raíz principal, en el suelo arenoso, la aplicación de Trichonativa incrementó el largo de la raíz principal (Figura 6.7.G y 6.7.H) y contrariamente, la aplicación de los productos Vitanica RZ y M3 en el mismo suelo constató una reducción significativa en esta variable (Figura 6.7.G). en el suelo arenoso no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos y control.

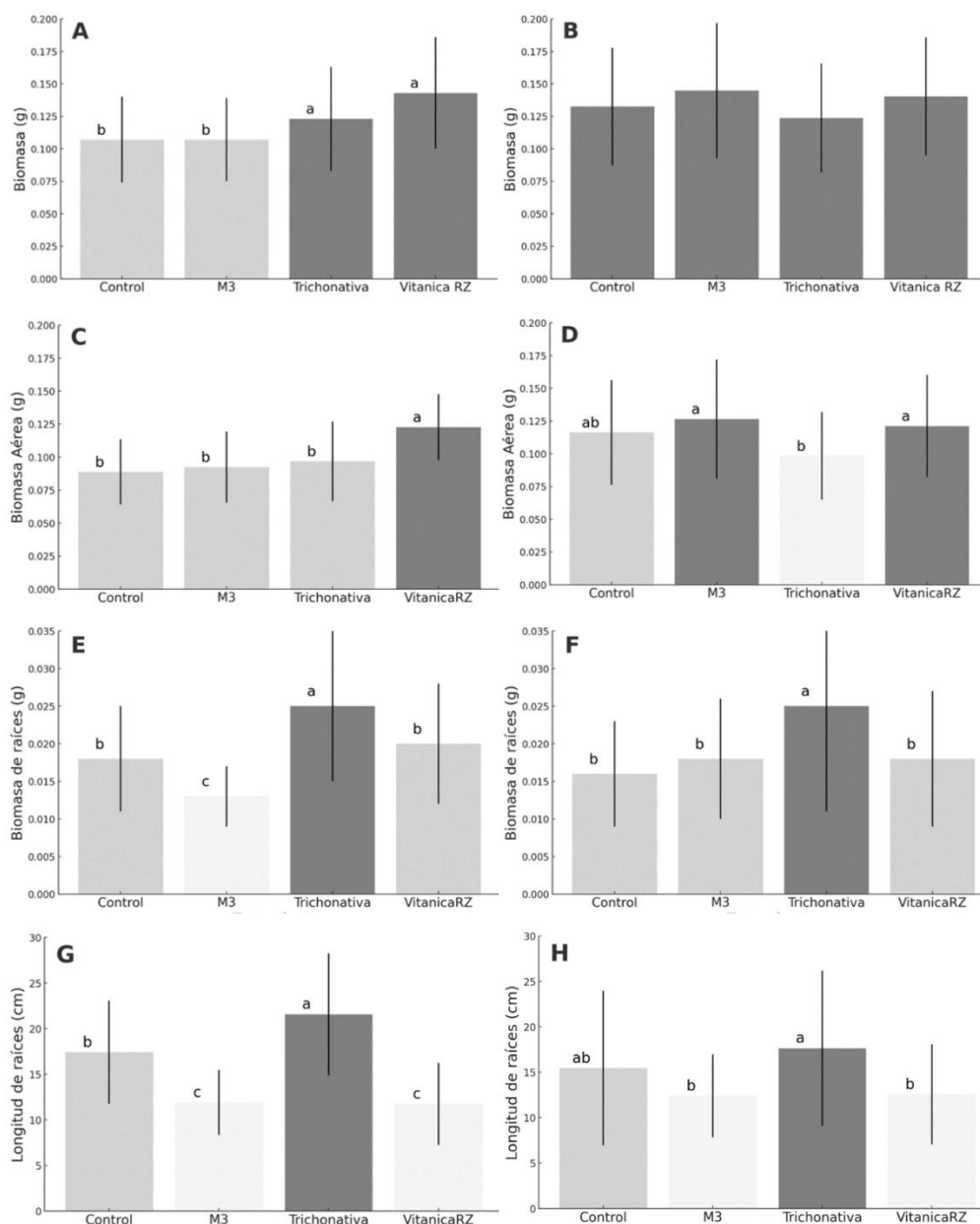


Figura 6.7 Biomasa total de plantas de *Pinus radiata* en el suelo arenoso (A) y granítico (B), biomasa aérea en suelo arenoso (C) y granítico (D), biomasa de raíz principal en suelo arenoso (E) y granítico (F) y longitud de raíces en suelo arenoso (G) y granítico (H), para los tratamientos con productos biológicos y control. Medias con letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p < 0,05$).

VII. DISCUSIÓN

Desde las primeras décadas del siglo XX, los agricultores han estado explorando el potencial del género *Bacillus* en viveros agrícolas, reconociendo sus propiedades como promotor de crecimiento (Sundara, 2002). A lo largo del tiempo, se ha confirmado que este género es capaz de incrementar el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y la solubilización de nutrientes esenciales, lo que lo ha convertido en una herramienta importante para la agricultura sostenible. (Rayavarapu & Tallapragada, 2016). Estudios más recientes han profundizado en el uso de cepas específicas, como *Bacillus amyloliquefaciens*, la cual destaca por su capacidad de activar la resistencia sistémica inducida (ISR) y la producción de compuestos antimicrobianos, lo que refuerza tanto el crecimiento como la defensa de las plantas demostrando un impacto notable en la promoción del crecimiento vegetal (Ngalimat *et al.*, 2021). En este estudio se observa una diferencia significativa en el bioproducto Vitanica RZ, que contiene *B. amyloliquefaciens*, en el suelo arenoso. A pesar de haber incrementado significativamente la biomasa total y aérea de las plántulas de *P. radiata* en el mismo suelo arenoso, similar al efecto observado en estudios mencionados, presenta una mayor mortalidad, con una sobrevivencia del 47,4%, comparado con los otros bioproductos y el control asociado a la presencia de especies de *Fusarium*, indicando que el efecto antagónico observado para diversas especies y cepas de *Bacillus spp.* no siempre será

efectivo contra algunas especies *Fusarium spp.* (Mejía-Bautista *et al.* 2016). En este caso, la mortalidad de plantas de *P. radiata* se concentró en una repetición del tratamiento, lo que podría atribuirse a que la homogenización de la mezcla del suelo no hubiese sido completa y que de esta manera la densidad de inóculo natural de *Fusarium* en una repetición fuese mayor. En este contexto, la densidad de inóculo de un patógeno en el suelo, junto con la cantidad y diversidad de la microbiota nativa, pueden influir en la capacidad del bioproducto para mitigar la acción de organismos nocivos (Shishido *et al.*, 1996). Es posible que en condiciones de alta prevalencia de patógenos o en un suelo con una comunidad microbiana compleja, la eficacia de *B. amyloliquefaciens* se vea limitada, resultando en la mortalidad observada. Por otro lado, los demás tratamientos, muestran una sobrevivencia con porcentajes sobre el 90% en el suelo arenoso.

El bioproducto Trichonativa, formulado en base a cepas de *Trichoderma harzianum*, *T. virens* y *T. parceramosum*, fue el que presenta un mayor efecto en la promoción de crecimiento, especialmente en suelo arenoso, donde incrementa las variables de biomasa total, de raíz y longitud de la raíz, y con un efecto en la biomasa de raíces en suelo granítico. Estos hallazgos son coherentes con múltiples estudios que han destacado el papel de especies de *Trichoderma* como agentes de biocontrol y promotores de crecimiento vegetal en diversas especies forestales, incluyendo *P. radiata* y *Eucalyptus globulus* (Donoso *et al.*, 2008b; Penón *et al.*, 1997b; Hernández-Melchor *et al.*, 2019b).

De manera complementaria, *T. virens* ha sido estudiado por su capacidad de aumentar la biomasa y promover el crecimiento de raíces laterales a través de un mecanismo dependiente de auxinas (Contreras-Cornejo *et al*, 2009). Demostrando que estos hongos podrían ejercer estos efectos positivos en el crecimiento de raíces a través de diversos mecanismos, entre los que plantean, la competencia por nutrientes y espacio, micoparasitismo, producción de metabolitos antifúngicos, y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Infante *et al.*, 2009b).

El prototipo M3, diseñado específicamente para el control de *F. circinatum*, no estimula el crecimiento de las plantas de *P. radiata*, incluso se constata un efecto inhibitorio en el suelo arenoso, con una reducción en la biomasa de raíces y en la longitud de la raíz.

Al considerar el crecimiento en condiciones de plantación, es fundamental evaluar qué tipo de crecimiento es más relevante para la supervivencia y productividad de las plantas. En este caso, el mayor crecimiento aéreo promovido por Vitanica RZ podría ser beneficioso a corto plazo, ya que una mayor biomasa aérea permite una mayor fotosíntesis y acumulación de biomasa. Sin embargo, el desarrollo de las raíces promovido por Trichonativa podría ser más relevante a largo plazo, ya que el incremento en estas variables podría contribuir no solo a una mayor absorción de nutrientes y agua, lo que podría traducirse en una mejor adaptación y supervivencia de las plantas en

etapas tempranas de desarrollo, factor crítico en la silvicultura comercial y la restauración ecológica (García-Díaz et al., 2019).

La eficacia de Trichonativa (en suelos arenosos y graníticos) y Vitanica RZ (en suelo arenoso) está directamente relacionada con las características fisicoquímicas de cada tipo de suelo. Factores como la textura, porosidad, capacidad de retención de agua, pH, materia orgánica y nutrientes disponibles pueden influir en cómo estos productos interactúan con el suelo y la microbiota nativa. Por ejemplo, en suelos con buena porosidad y menor retención de agua, como los arenosos, Vitanica RZ puede mostrar un mejor desempeño al facilitar la movilidad de los nutrientes. Sin embargo, estas mismas condiciones pueden no ser ideales en suelos más compactos o ricos en nutrientes, como los graníticos o arcillosos. Por tanto, es esencial estudiar estas características antes de aplicar los bioproductos, ya que pueden potenciar o limitar su eficacia (Moraga-Suazo & Sanfuentes, 2017b).

Adicionalmente, la inoculación de semillas con *Bacillus* promotores del crecimiento puede ser particularmente beneficiosa en suelos marginales, como los suelos arenosos, donde la competencia microbiana es menor y las plantas dependen más de interacciones benéficas para obtener nutrientes y resistir el estrés ambiental (Chanway & Holl, 1991). Los suelos arenosos, al tener una menor retención de agua y nutrientes, proporcionan un ambiente menos competitivo para las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y

hongos como *T. harzianum* (Bjorkman, T. 1999), lo que facilita su establecimiento y acción. Este mecanismo podría explicar los buenos resultados obtenidos con Vitanica RZ y Trichonativa en suelos de baja calidad, ya que, en estos suelos, las plantas son más dependientes de las interacciones benéficas para sobrevivir y desarrollarse. En cambio, en suelos más fértiles, como los suelos arcillosos, que retienen mejor los nutrientes y presentan una microbiota más compleja y competitiva, la eficacia de las PGPR puede verse reducida debido a la competencia con microorganismos nativos que ya ocupan los nichos ecológicos (Shishido *et al.*, 1996b). Esta diferencia en las características fisicoquímicas de los suelos podría explicar por qué los efectos de promoción del crecimiento observados con Vitanica RZ y del ensayo en general, son más significativos en suelos arenosos que en suelos arcillosos.

Los resultados de este estudio subrayan la importancia de seleccionar y adaptar bioproductos según el tipo de suelo y las condiciones específicas del entorno. Es así como el bioproducto Trichonativa se presenta como una opción potencialmente eficaz para suelos arenosos para promover el crecimiento de *P. radiata*, especialmente sobre las raíces, el cual es indispensable para tener una mayor sobrevivencia y eventualmente crecimiento en la etapa del establecimiento de las plantaciones de *P. radiata*. Vitanica RZ también muestra un cierto potencial en suelos arenosos, aunque su eficacia podría estar minimizada por la presencia de patógenos agresivos como especies de *Fusarium*. La integración de estos bioproductos en prácticas silvícolas podría

contribuir significativamente a mejorar la productividad y sostenibilidad de los sistemas forestales.

VIII. CONCLUSIONES

Los bioproductos comerciales no tuvieron efecto en incrementar la emergencia y la sobrevivencia de plántulas de *P. radiata* en ambos tipos de suelo.

Los bioproductos Trichonativa y Vitanica RZ aplicados en suelo arenoso tuvieron efectos promotores en el crecimiento en plantas de *P. radiata*, como también Trichonativa en el suelo granítico.

Se constató un efecto inhibitorio en el crecimiento de la raíz principal por Vitanica RZ en suelo arenoso.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Barrera Berdugo, S. E. (2009). El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura.

Bjorkman, T. (1999). Conferencia y feria comercial de productores de hortalizas y bayas de Nueva Inglaterra, Sturbridge, MA. Actas de la Conferencia, 310-312. Universidad de Cornell, Departamento de Ciencias Hortícolas

Büchner, C., Stuvén, M., Sagardía Parga, R., et al. (Eds.). (2018). Disponibilidad de madera de plantaciones de pino radiata y eucalipto (2017-2047).

Büchner, C. M., Sagardía, Y. G., Rojas, F., Barrientos, R. M. G., & Aravena, A. (2021). Análisis de los factores que están incidiendo en la oferta de madera de plantaciones forestales en los últimos años. <31346.pdf>

Chanway, C. P., & Holl, F. B. (1991). Inoculation of conifer seed with plant growth promoting *Bacillus* strains causes increased seedling emergence and biomass.

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 149(3), 1579–1592.

Donoso, E., Lobos, G. A., & Rojas, N. (2008). Efecto de *Trichoderma harzianum* y compost sobre el crecimiento de plántulas de *Pinus radiata* en vivero. *Bosque (Valdivia)*, 29(1), 52-57.

Egamberdiyeva, D. (2003). Efecto de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el crecimiento de plántulas de pino silvestre y abedul plateado.

García-Díaz, S. E., Aldrete, A., Alvarado-Rosales, D., Cibrián-Tovar, D., & Méndez-Montiel, J. T. (2019). *Trichoderma harzianum* Rifai as a biocontrol of *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell in seedlings of *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. in three substrates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(3), 353-367.

Godínez Álvarez, H., & Flores Martínez, A. (2000). Germinación de semillas de 32 especies de plantas de la costa de Guerrero: su utilidad para la restauración ecológica. *Polibotánica*, 11, 1.

González, D. C. (1987). Apuntes y consideraciones para la historia del pino radiata en Chile.

González, M. E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F., Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, Ugarte, A. M., & Sepúlveda, A. (2020). Incendios forestales en Chile y la necesidad de avanzar hacia paisajes más resilientes.

Grossnickle, S. C., Abrams, S. R., Rose, P. A., & Major, J. E. (1996). Performance of interior spruce seedlings treated with abscisic acid analogs. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(12), 2061-2070.

Hernández-Melchor, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). Trichoderma: Importancia agrícola, biotecnológica y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(1), 98-112.

Infante, D., Martínez, B., González, N., & Reyes, Y. (2009). Mecanismos de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos. *Revista de Protección Vegetal*, 24(1), 14-21.

Instituto Forestal (INFOR). (2022). Disponibilidad de madera de plantaciones de pino radiata y eucaliptos: 2021-2051

Instituto Forestal (INFOR). (2023). Anuario forestal.

Mejía-Bautista, M. Á., Reyes-Ramírez, A., Cristobal-Alejo, J., Tun-Suárez, J. M., Borges-Gómez, L. D. C., & Pacheco-Aguilar, J. R. (2016). *Bacillus spp.* en el control de la marchitez causada por *Fusarium spp.* en *Capsicum chinense*. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 34(3).

Moraga-Suazo, P., & Sanfuentes, E. (2017). Growth promotion of *Pinus radiata* seedlings by soil inoculation and seed pretreatment with the biological control agent *Clonostachys rosea*. *Gayana Botanica*, 74(1), 140-146.

Muthukumar, T., & Udaiyan, K. (2006). Growth of nursery-grown bamboo inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting

rhizobacteria in two tropical soil types with and without fertilizer application. *New Forests*, 31(3), 469-485.

Ngalimat, M. S., Yahaya, R. S. R., Baharudin, M. M. A.-A., Yaminudin, S. M., Karim, M., Ahmad, S. A., & Sabri, S. (2021). Una revisión sobre las aplicaciones biotecnológicas del grupo operativo *Bacillus amyloliquefaciens*. *Microorganisms*, 9(614).

Penon, E. C., Giachino, V., De Falco, P., Sobero, M., Rojo, M., & Rodríguez, P. y T. (1997). Uso de *Trichoderma harzianum* Rifai como promotor de crecimiento en producción en vivero *Eucalyptus globulus* Labill. <Uso de *Trichoderma harzianum* Rifai como promotor de crecimiento en producción en vivero *Eucalyptus globulus* Labill..pdf>

Rabeendran, N., Jones, E. E., & Stewart, A. (2000). Inconsistent growth promotion of cabbage and lettuce from *Trichoderma* isolates.

Rayavarapu, B., & Tallapragada, P. (2016). *Bacillus* sp. as potential plant growth promoting rhizobacteria. *International Journal of Advanced Life Sciences*, 9(1), 29-35.

Shishido, M., Massicotte, H. B., & Chanway, C. P. (1996). Effect of plant growth promoting strains on pine and spruce seedling growth and mycorrhizal infection. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(4), 639-644.

Sundara, B. V. N., & Hari, K. (2002). Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields.

Zhuang, X., Chen, J., Shim, H., & Bai, Z. (2007). New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environment International*, 33(3), 406-413.

X. APÉNDICE

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
%Emergencia	27	0,65	0,52	5,97

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	980,91	7	140,13	5,09	0,0022
Trt	241,47	3	80,49	2,93	0,0603
Suelo	694,54	1	694,54	25,24	0,0001
Trt*Suelo	70,91	3	23,64	0,86	0,4792
Error	522,81	19	27,52		
Total	1503,72	26			

ANOVA factorial en porcentaje de emergencia

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
%Sobrevivencia	31	0,78	0,72	10,46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6397,68	7	913,95	11,80	<0,0001
Suelo	1410,50	1	1410,50	18,21	0,0003
Trt	3622,08	3	1207,36	15,59	<0,0001
Suelo*Trt	1241,85	3	413,95	5,34	0,0061
Error	1781,41	23	77,45		
Total	8179,09	30			

ANOVA factorial en porcentaje de sobrevivencia