

Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la germinación y desarrollo de plántulas de Gmelina arborea**Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on the Germination and Seedling Development of Gmelina arborea**

Enrique José Nieto Rodríguez, Ronald Oswaldo Villamar Torres, Oscar Oswaldo Prieto Benavides,
Nicolás Javier Cruz Rosero & Naomi Kaymara Wong Carriel

DIMENSIÓN CIENTÍFICA**Enero - junio, V°7 - N°1; 2026****Recibido:** 04-06-2026**Aceptado:** 23-06-2026**Publicado:** 29-06-2026**PAIS**

- Ecuador, Quevedo
- Ecuador, Quevedo
- Ecuador, Quevedo
- Ecuador, Quevedo
- Ecuador, Quevedo

INSTITUCION

- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo

CORREO:

- ✉ jnieto@uteq.edu.ec
- ✉ rvillamart@uteq.edu.ec
- ✉ oprieto@uteq.edu.ec
- ✉ jcruz@uteq.edu.ec
- ✉ naomi.wong2017@uteq.edu.ec

ORCID:

-  <https://orcid.org/0000-0002-7919-9918>
-  <https://orcid.org/0000-0003-2511-1789>
-  <https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>
-  <https://orcid.org/0000-0002-5793-9380>
-  <https://orcid.org/0009-0006-5393-7640>

FORMATO DE CITA APA.

Nieto, E., Villamar, R., Prieto, O., Cruz, N. & Wong, N. (2026). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la germinación y desarrollo de plántulas de Gmelina arborea. *Revista G-ner@ndo*, V°7 (N°1). Pág. 6995 – 7016.

Resumen

La germinación irregular y el bajo vigor inicial limitan la producción de Gmelina arborea. Este estudio evaluó la inoculación de cepas PGPR sobre germinación, morfometría y calidad de plántulas. Se aplicó un diseño completamente al azar con 10 tratamientos: testigo y las cepas *Acinetobacter calcoaceticus* BMR 2 12, *Enterobacter asburiae* PM 3 14 y *Pseudomonas putida* PB 3 6 en concentraciones de 10, 15 y 20 % v/v. Las semillas se sometieron a bioprimer y, tras la emergencia, las plántulas recibieron inoculación radicular. A los 40 días se midieron variables aéreas y subterráneas. Los tratamientos generaron respuestas específicas según cepa y concentración. A. calcoaceticus al 20 % elevó la germinación a 50,2 % frente al control y potenció el diámetro del tallo y el índice de robustez. E. asburiae al 20 % incrementó altura (más de 40 cm), número de hojas, biomasa foliar y longitud radical, duplicando el rendimiento del testigo. P. putida mostró efectos intermedios. En conclusión, el uso selectivo de PGPR es una estrategia biotecnológica eficaz para mejorar atributos morfoestructurales de G. arborea, acortar ciclos de producción y reducir la dependencia de insumos químicos. Los efectos fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$) y dependieron de la interacción entre cepa y concentración aplicada, evidenciando la necesidad de protocolos específicos para cada bioinoculante. El estudio resalta la especialización de las cepas y respalda el uso de bioinsumos para reforestación sostenible en vivero moderno.

Palabras clave: Calidad de planta; *Enterobacter asburiae*; Biofertilización; Silvicultura sostenible; Rizosfera forestal.

Abstract

Irregular germination and low initial vigor limit the production of Gmelina arborea. This study evaluated the inoculation of PGPR strains on germination, morphometry and seedling quality. A completely randomized design was applied with ten treatments: a control and the strains *Acinetobacter calcoaceticus* BMR 2-12, *Enterobacter asburiae* PM 3-14 and *Pseudomonas putida* PB 3-6 at concentrations of 10, 15 and 20% (v/v). The seeds were subjected to bioprimering and, after emergence, the seedlings received root inoculation. After 40 days, both aerial and below-ground variables were measured. The treatments generated specific responses depending on the strain and concentration. A. calcoaceticus at 20% increased germination to 50.2% compared to the control and enhanced stem diameter and robustness index. E. asburiae at 20% increased height (over 40 cm), number of leaves, foliar biomass and root length, doubling the performance of the control. P. putida showed intermediate effects. In conclusion, the selective use of PGPR is an effective biotechnological strategy to improve the morphostructural attributes of G. arborea, shorten production cycles and reduce reliance on chemical inputs. The effects were statistically significant ($p < 0.05$) and depended on the interaction between strain and concentration applied, highlighting the need for specific protocols for each bioinoculant. The study underscores the specialization of the strains and supports the use of bioinputs for sustainable reforestation in modern nurseries.

Keywords: Seedling quality; *Enterobacter asburiae*; Biofertilization; Sustainable forestry; Forest rhizosphere.

Introducción

La germinación sincronizada de las semillas representa una transición ontogénica crítica para garantizar el éxito operativo de los sistemas forestales controlados (Fiodor et al., 2023). En especies de alto valor comercial, como *Gmelina arborea*, el establecimiento homogéneo de las plántulas suele verse limitado por variables fisiológicas intrínsecas y condiciones ambientales subóptimas que deprimen el vigor inicial de los tejidos vegetales (Ledea et al., 2020). Históricamente, la optimización de estos indicadores biológicos se ha solventado mediante la dosificación de insumos de síntesis química o reguladores de crecimiento artificiales (Basu et al., 2021). No obstante, la tendencia hacia la intensificación ecológica de la silvicultura contemporánea exige el desarrollo urgente de biotecnologías sostenibles basadas en interacciones microbiológicas específicas que no alteren las dinámicas ecosistémicas (Basu et al., 2021).

Las evidencias científicas demuestran que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, colectivamente denominadas PGPR, constituyen una alternativa viable para estimular el metabolismo vegetal primario (Basu et al., 2021). De acuerdo con Mohanty et al. (2021), estas comunidades microbianas influyen en el desarrollo vegetal mediante mecanismos directos e indirectos, facilitando procesos clave como la germinación de las semillas, el crecimiento de las plántulas y el rendimiento final del cultivo. La colonización efectiva del sistema radicular por estos microorganismos acelera los procesos de imbibición celular y activa de manera temprana las cascadas enzimáticas digestivas dentro de las semillas (Fiodor et al., 2023). Diferentes investigaciones documentan que géneros como *Bacillus* y *Azospirillum* potencian parámetros morfológicos clave, incrementando significativamente la biomasa aérea y la tasa de expansión foliar en plántulas forestales y agrícolas (Ledea et al., 2020). Asimismo, estas comunidades optimizan la arquitectura del sistema radicular, lo que induce una mayor capacidad de captación hídrica y nutricional por

parte del hospedero (Ledea et al., 2020). Al respecto, Pérez et al. (2023) puntualizan que la inoculación bacteriana no solo maximiza la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes a través de la expansión de la longitud radical, sino que también incrementa significativamente el vigor de la semilla y el índice de germinación en comparación con tratamientos control.

A pesar de los beneficios observados en cultivos tradicionales, la respuesta morfofisiológica de *Gmelina arborea* frente a inóculos bacterianos nativos o selectos aún manifiesta marcadas inconsistencias bajo condiciones controladas (Ledea et al., 2020). Esta variabilidad radica en que los mecanismos de acción bacteriana, tales como la biosíntesis endógena de auxinas específicamente el ácido indolacético— y la solubilización biológica de fósforo o potasio, no se expresan de manera uniforme entre especies arbóreas de rápido crecimiento (Fiodor et al., 2023). Este fenómeno genera incertidumbre sobre la estabilidad del inóculo dentro del sustrato y su compatibilidad metabólica real con el embrión forestal (Basu et al., 2021). Por consiguiente, existe una brecha de conocimiento respecto a las concentraciones óptimas de aplicación y la especificidad de las cepas bacterianas necesarias para maximizar los índices de calidad de plántula en leñosas tropicales bajo regímenes de vivero.

La presente investigación se justifica en la necesidad técnica de estandarizar protocolos de biofertilización eficientes que reduzcan los ciclos de producción en vivero y eleven el índice de calidad de Dickson de *Gmelina arborea*. Evaluar la interacción biológica precisa entre las bacterias promotoras del crecimiento vegetal y las semillas forestales posibilitará la sustitución gradual de compuestos químicos tradicionales por bioinoculantes ecológicos de alta fidelidad (Basu et al., 2021). Además, los datos obtenidos aportarán bases científicas conceptuales aplicables a programas de reforestación comercial y restauración biológica de suelos degradados. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto

de la inoculación de diferentes cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre los porcentajes de germinación, el desarrollo morfométrico y los índices de calidad de plántulas de *Gmelina arborea* bajo condiciones controladas.

Métodos y Materiales

Ubicación del Experimento y Condiciones Ambientales

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Biotecnología, ubicado en el Campus La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), en la provincia de Los Ríos, Ecuador (01° 04' 48,6" S; 79° 30' 04,2" O), a una altitud de 85 msnm. Las condiciones ambientales dentro del invernadero se mantuvieron bajo un régimen de riego controlado, registrando una temperatura entre 25 y 30 °C y una humedad relativa del 70 al 80 %.

Origen, Conservación y Preparación del Inóculo de PGPR

Se emplearon tres cepas de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR): *Acinetobacter calcoaceticus* (cepa BMR 2-12), *Enterobacter asburiae* (cepa PM 3-14) y *Pseudomonas putida* (cepa PB 3-6), proporcionadas por el banco de germoplasma del laboratorio de la UTEQ (Chávez et al., 2018). Los aislados bacterianos se encontraban conservados mediante criopreservación a -80 °C en una solución de glicerol al 10 % suplementada con quitina coloidal al 1 % (v/v).

Para la reactivación y preparación del preinóculo, cada cepa se cultivó individualmente en matraces Erlenmeyer con 100 mL de medio líquido King B (King et al., 1954), manteniéndose en incubación con agitación constante a 150 rpm durante 72 h a 27 °C. Las suspensiones bacterianas obtenidas se centrifugaron, lavaron y ajustaron espectrofotométricamente a una concentración celular aproximada de $1,5 \times 10^9$ UFC mL⁻¹.

A partir de esta suspensión madre, se realizaron diluciones seriadas utilizando agua destilada estéril como vehículo para obtener las concentraciones volumétricas finales de inoculación correspondientes al 10 %, 15 % y 20 % (v/v), cuyas densidades celulares específicas por tratamiento se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Tratamientos evaluados con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en plántulas de Gmelina arborea*

Tratamiento	Organismo	Concentración
Control	Sin inoculación	0 % (agua estéril)
T1	<i>A. calcoaceticus</i> (BMR 2-12)	10% (2.55×10^4 UFC mL ⁻¹)
T2	<i>E. asburiae</i> (PM 3-14)	10% (1.05×10^4 UFC mL ⁻¹)
T3	<i>P. putida</i> (PB 3-6)	10% (1.30×10^4 UFC mL ⁻¹)
T4	<i>A. calcoaceticus</i> (BMR 2-12)	15% (2.15×10^6 UFC mL ⁻¹)
T5	<i>E. asburiae</i> (PM 3-14)	15% (1.00×10^6 UFC mL ⁻¹)
T6	<i>P. putida</i> (PB 3-6)	15% (1.21×10^6 UFC mL ⁻¹)
T7	<i>A. calcoaceticus</i> (BMR 2-12)	20% (4.76×10^8 UFC mL ⁻¹)
T8	<i>E. asburiae</i> (PM 3-14)	20% (1.10×10^8 UFC mL ⁻¹)
T9	<i>P. putida</i> (PB 3-6)	20% (3.52×10^8 UFC mL ⁻¹)

Desinfección Superficial y Biopriming de Semillas de Gmelina arborea

El proceso de desinfección superficial de las semillas de Gmelina arborea Roxb. se estandarizó mediante la inmersión consecutiva en alcohol al 70 % (v/v) durante 3 min y en hipoclorito de sodio (NaClO) al 1 % (v/v) durante 5 min, concluyendo con cinco lavados sucesivos con agua destilada estéril para eliminar trazas de los agentes desinfectantes.

Posteriormente, las semillas fueron sometidas a un proceso de biopriming o inoculación biológica mediante inmersión individual en las suspensiones de cada cepa bacteriana ajustadas según las dosis correspondientes (10 %, 15 % y 20 % v/v) por un período de 10 min (Macías-Holguín et al., 2023). Este procedimiento de acondicionamiento

fisiológico y microbiológico se fundamenta en la capacidad de las PGPR para colonizar la superficie seminal, optimizar los gradientes hídricos y estimular la velocidad de imbibición (Fiodor et al., 2023; Mahmood et al., 2016).

Para la fase de germinación, las semillas tratadas se dispusieron en contenedores plásticos sobre papel absorbente estéril previamente humedecido con agua destilada e incubadas en oscuridad a una temperatura constante de 28 °C durante un período de 15 días (Arumugam et al., 2024). El porcentaje e índice de germinación final se evaluaron cuantitativamente aplicando las ecuaciones descritas por Alizaga y Herrera (2010).

Ensayo en Invernadero y Aplicación de Tratamientos

Una vez emergidas, las plántulas de *G. arborea* se trasplantaron bajo condiciones de invernadero. La inoculación definitiva de los tratamientos microbianos se ejecutó mediante riego radicular directo (drench), distribuyendo el inóculo de manera homogénea alrededor de la rizosfera para asegurar el contacto bacteriano con el sistema de raíces. Esta vía de inoculación permite evaluar la eficiencia de las cepas en la rizosfera a través de mecanismos directos de promoción del crecimiento vegetal, tales como la biosíntesis de fitohormonas, principalmente auxinas como el ácido indol-3-acético (AIA), y la solubilización de nutrientes esenciales como el fósforo y el potasio (Basu et al., 2021; Fiodor et al., 2023; Glick, 2012; Vessey, 2003).

Variables Morfométricas Evaluadas

La recolección de datos fenotípicos se realizó de forma sistemática cada ocho días durante un período de cinco semanas (40 días) posteriores a la inoculación radicular. En cada unidad experimental se evaluaron las siguientes variables morfométricas y de calidad de planta:

- Diámetro basal (mm): medido en la zona del cuello de la plántula utilizando un calibrador digital.
- Número de hojas: conteo visual directo de estructuras foliares funcionales y completamente expandidas.
- Longitud radicular (cm): longitud medida desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la raíz principal.
- Peso foliar (g): masa determinada mediante balanza analítica de precisión.
- Índice de robustez: calculado mediante la relación entre la altura de la parte aérea y el diámetro basal de la plántula.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El experimento se condujo bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA), constituido por 10 tratamientos en total (nueve combinaciones bacterianas y un testigo absoluto), con cuatro repeticiones y cinco unidades experimentales por réplica. Los datos se expresaron mediante la media aritmética acompañada de su desviación estándar ($\pm$ DE).

Previo a la ejecución de los análisis estadísticos inferenciales, se verificaron los supuestos fundamentales de los modelos lineales. La normalidad de los residuos se determinó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Bartlett. Una vez validados los supuestos, los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA). Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$), se realizó la separación y comparación de medias mediante la prueba de rangos múltiples de Tukey ($p \leq 0,05$). Todos los procedimientos y análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020).

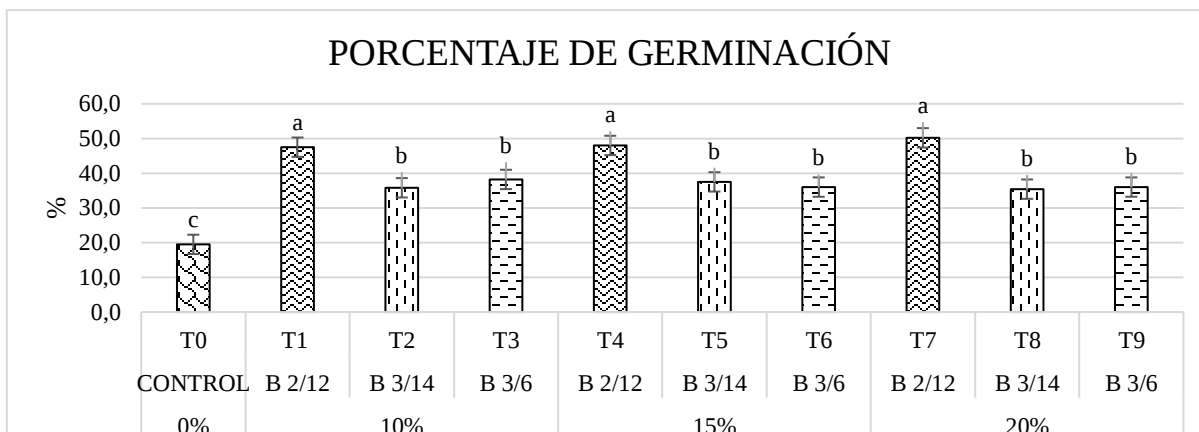
Análisis de resultados

Germinación de semillas

La germinación de semillas de *Gmelina arborea* presentó una respuesta diferencial frente a la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), evidenciando que la aplicación de estos microorganismos influyó significativamente en el establecimiento inicial de las plántulas. A los 20 días de evaluación se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos estudiados ($p < 0,05$), lo que demuestra la capacidad de las cepas bacterianas para estimular los procesos fisiológicos relacionados con la germinación.

El tratamiento T7, correspondiente a la cepa bacteriana 2/12 aplicada en una concentración del 20 %, alcanzó el mayor porcentaje de germinación, registrando un valor promedio de 50,2 %. Este resultado superó significativamente al resto de los tratamientos evaluados y reflejó una mayor capacidad de emergencia de las semillas bajo la influencia de dicha cepa bacteriana. En contraste, el tratamiento control presentó los menores porcentajes de germinación, con valores inferiores al 20 %, lo que evidencia el efecto positivo de la inoculación bacteriana sobre el proceso germinativo. Los resultados sugieren que la cepa 2/12 favoreció la activación metabólica de las semillas y promovió condiciones fisiológicas adecuadas para acelerar la emergencia y establecimiento inicial de las plántulas (Figura 1).

Figura 1. Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en la germinación de semillas de *G. arbórea*. Evaluación a los 20 días. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



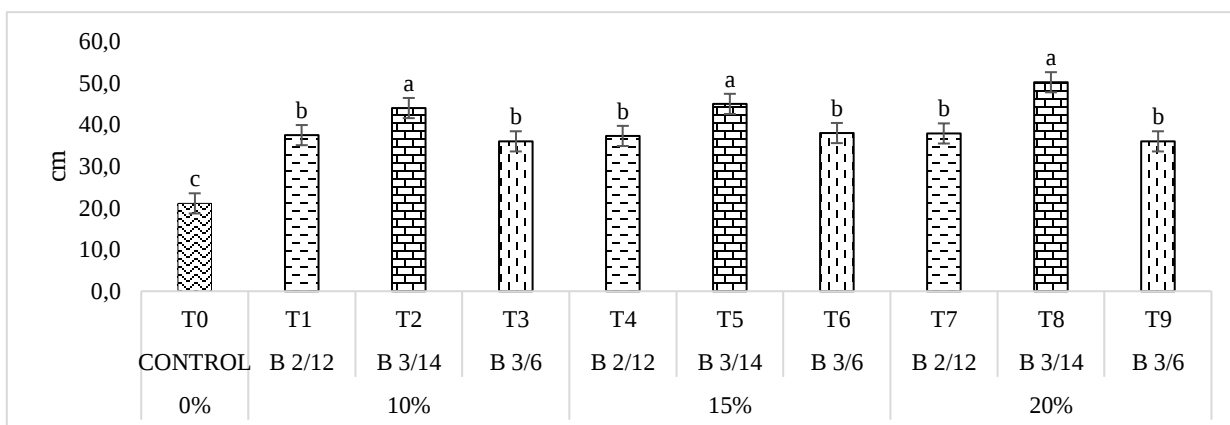
Altura

La altura de las plántulas constituye uno de los principales indicadores de crecimiento vegetativo durante las etapas iniciales de desarrollo. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de PGPR produjo efectos significativos sobre esta variable, observándose diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados ($p < 0,05$).

Las mayores alturas se registraron en los tratamientos T2, T5 y T8, todos asociados a la cepa bacteriana 3/14. Estos tratamientos conformaron un grupo estadísticamente superior respecto al resto de las dosis evaluadas y al tratamiento control. El incremento en la longitud del tallo observado en estas variantes evidencia una respuesta favorable de las plántulas ante la acción de los microorganismos promotores del crecimiento. Por otro lado, el tratamiento control presentó valores inferiores a 40 cm, confirmando la menor capacidad de crecimiento en ausencia de inoculación bacteriana. Los resultados indican que la cepa 3/14 favoreció procesos fisiológicos relacionados con la división y elongación celular,

contribuyendo al desarrollo vigoroso de las plántulas durante los primeros 40 días de crecimiento (Figura 2).

Figura 2. Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en la altura en plántulas de *G. arbórea*. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p<0.05$ (test Tukey).



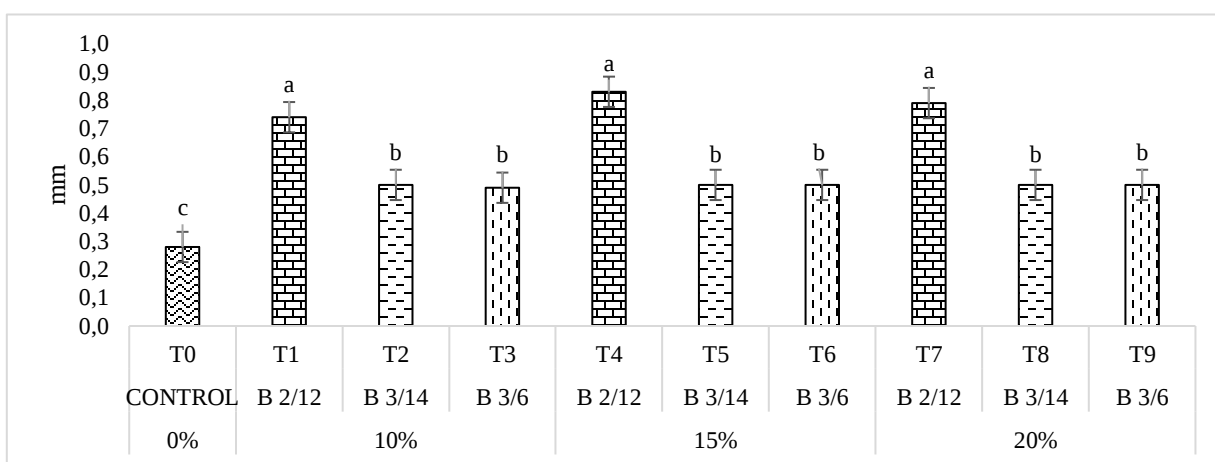
Diámetro del tallo

El diámetro del tallo mostró una respuesta significativa a la inoculación con las cepas bacterianas evaluadas. Esta variable es considerada un indicador importante de la calidad de planta, ya que se relaciona directamente con la resistencia mecánica y la capacidad de supervivencia después del trasplante.

Los mayores diámetros fueron obtenidos en los tratamientos asociados a la cepa bacteriana 2/12, independientemente de la concentración utilizada. Dichos tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas respecto a las demás unidades experimentales, evidenciando una mayor capacidad de esta cepa para estimular el crecimiento radial del tallo. En contraste, el tratamiento control registró los menores valores, con diámetros inferiores a 0,4 mm. Este comportamiento demuestra que la presencia de PGPR favoreció la acumulación de biomasa estructural y el fortalecimiento de los tejidos

vegetales. La superioridad observada en los tratamientos inoculados sugiere una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes y en la producción de fitohormonas relacionadas con el crecimiento vegetal (Figura 3).

Figura 3. Efectos de la inoculación de las bacterias PGPR en el diámetro en plántulas de *G. arbórea*. Evaluación a los 40 días. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



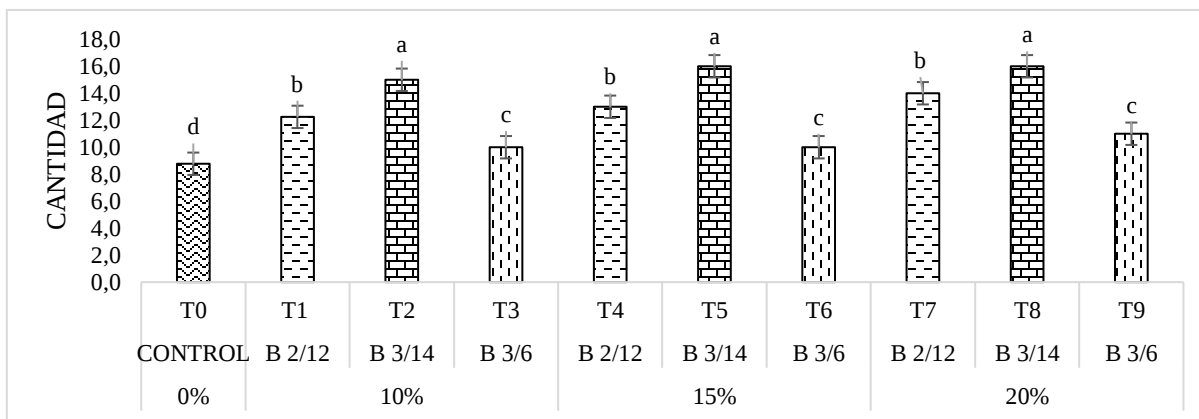
Número de hojas

La producción de hojas constituye un parámetro fundamental para evaluar el potencial fotosintético de las plantas y su capacidad para acumular biomasa. Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos, atribuibles al efecto de las rizobacterias utilizadas en el estudio.

Las plántulas inoculadas con la cepa bacteriana 3/14 registraron los mayores promedios de hojas en todas las concentraciones evaluadas. Estos tratamientos fueron estadísticamente superiores al resto de las variantes experimentales, demostrando una respuesta consistente y favorable en la formación de estructuras foliares. El incremento del número de hojas implica una mayor superficie fotosintética disponible para la captura de

energía y producción de fotoasimilados, lo que contribuye al crecimiento general de la planta. Por el contrario, el tratamiento control presentó los valores más bajos, con menos de nueve hojas por plántula, evidenciando una menor capacidad de desarrollo vegetativo. Estos resultados confirman el efecto estimulador de las PGPR sobre la formación y expansión del aparato foliar (Figura 4).

Figura 4. Efectos simples de la inoculación de las bacterias PGPR en el número de hojas en plántulas de *G. arborea*. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



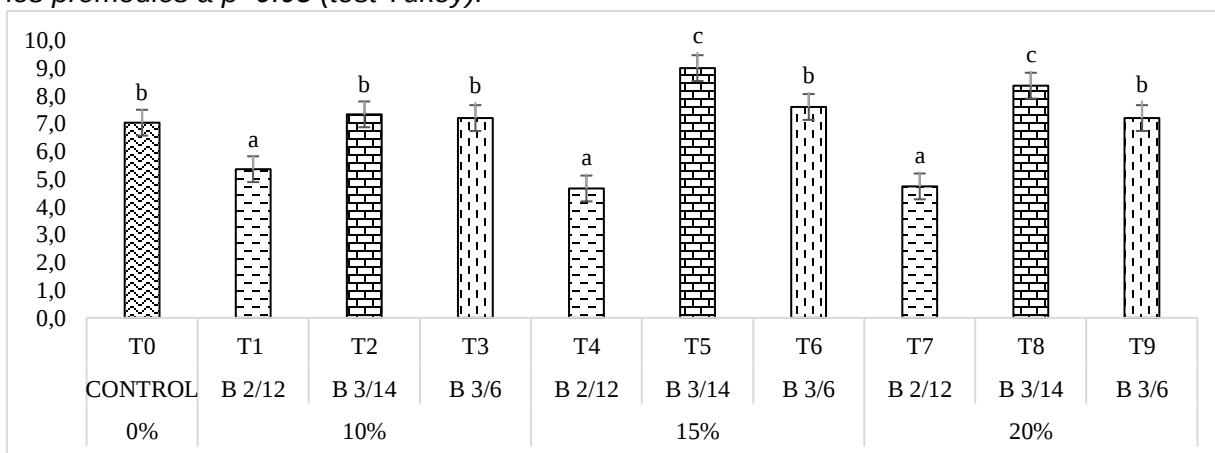
Índice de robustez

El índice de robustez es un parámetro ampliamente utilizado para evaluar la calidad morfológica de las plantas forestales, ya que integra la relación existente entre la altura del tallo y el diámetro del cuello de la raíz. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas entre tratamientos, indicando que la inoculación bacteriana modificó las características estructurales de las plántulas.

Los mayores valores del índice de robustez fueron registrados en el tratamiento T1, correspondiente a la cepa bacteriana 2/12. Este tratamiento alcanzó valores superiores a 7,0, diferenciándose significativamente del resto de las combinaciones evaluadas y del

grupo control. La respuesta observada sugiere que la cepa utilizada favoreció el equilibrio entre crecimiento longitudinal y desarrollo estructural, permitiendo la formación de plantas con características morfológicas adecuadas para su establecimiento posterior en campo. Los tratamientos no inoculados mostraron valores inferiores, reflejando una menor calidad estructural y potencial adaptativo. En términos generales, la aplicación de PGPR contribuyó a mejorar la robustez de las plántulas, aspecto fundamental para incrementar las probabilidades de supervivencia en etapas posteriores de desarrollo (Figura 5).

Figura 5. Valores obtenidos sobre índice de robustez en plántulas de *G. arbórea*. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



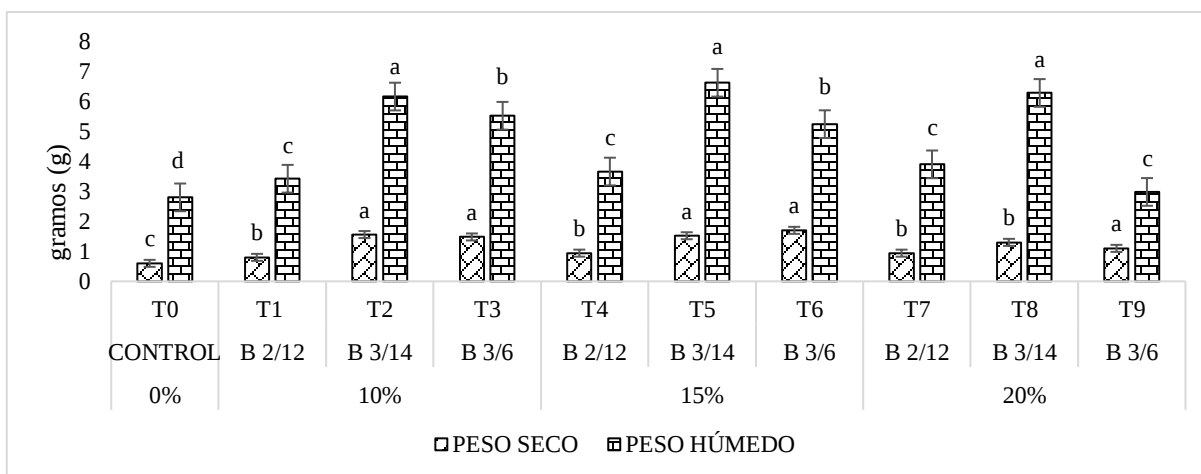
Peso foliar

La biomasa foliar, expresada mediante el peso húmedo y seco de las hojas, reflejó una respuesta positiva a la inoculación bacteriana. El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre tratamientos, indicando que las cepas utilizadas influyeron directamente en la acumulación de materia vegetal.

Los tratamientos T2, T5 y T8, asociados a la cepa bacteriana 3/14, registraron los mayores valores de biomasa foliar. Estos resultados fueron significativamente superiores a

los obtenidos en el resto de los tratamientos y en el grupo control. El incremento de la masa foliar sugiere una mayor eficiencia fotosintética y una mejor capacidad de utilización de nutrientes, factores que favorecen la acumulación de biomasa durante las etapas iniciales de crecimiento. En contraste, el tratamiento control presentó valores inferiores a 2,8 g, evidenciando un desarrollo limitado del tejido foliar. La respuesta observada confirma el potencial de las PGPR para estimular el crecimiento vegetal y mejorar el rendimiento fisiológico de las plántulas (Figura 6).

Figura 6. Valores obtenidos del peso foliar en cuanto al peso seco y húmedo en plántulas de *G. arbórea*. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



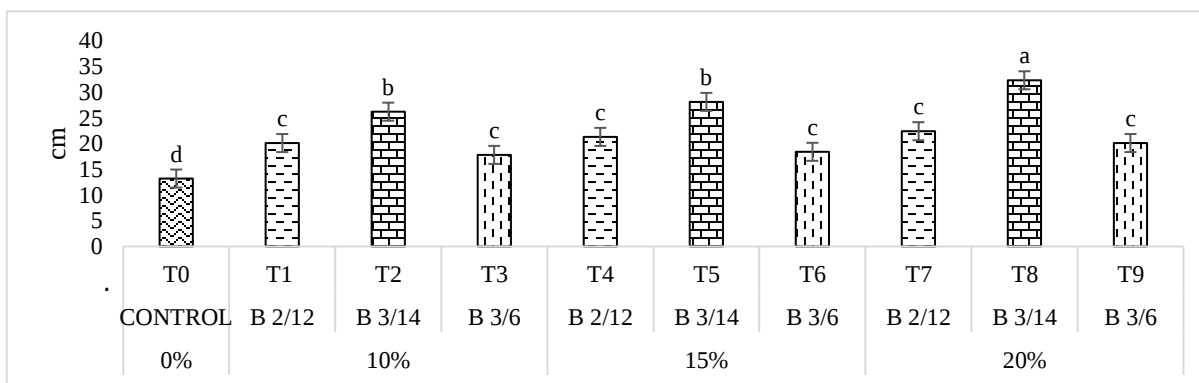
Longitud radicular

El desarrollo del sistema radicular mostró una marcada influencia de los tratamientos biológicos evaluados. La longitud de la raíz principal presentó diferencias significativas entre tratamientos a los 40 días de evaluación, lo que demuestra la capacidad de las PGPR para modificar el crecimiento subterráneo de las plantas.

El tratamiento T8, perteneciente a la cepa bacteriana 3/14, alcanzó la mayor longitud radicular dentro del ensayo, superando significativamente al resto de los tratamientos. Este

resultado evidencia una estimulación efectiva del crecimiento de las raíces, favoreciendo la exploración del sustrato y la absorción de agua y nutrientes. Por su parte, el tratamiento control registró longitudes inferiores a 13,2 cm, constituyendo el menor desarrollo radicular observado en el estudio. El fortalecimiento del sistema radical inducido por la inoculación bacteriana representa una ventaja importante para el establecimiento y supervivencia de las plántulas, especialmente durante las primeras etapas de crecimiento. En conjunto, los resultados indican que la cepa 3/14 posee un elevado potencial para promover el desarrollo radicular y mejorar el desempeño agronómico de *G. arborea* en vivero (Figura 7).

Figura 7. Valores obtenidos sobre la longitud radicular en plántulas de *G. arborea*. Evaluación a los 40 días. Las barras de error indican $\pm ES$; diferentes letras muestran diferencias significativas entre los promedios a $p < 0.05$ (test Tukey).



Discusión

La inoculación de semillas y plántulas de *Gmelina arborea* con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) demostró una influencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en todas las variables morfológicas y fisiológicas evaluadas durante las etapas iniciales de desarrollo. Este comportamiento corrobora las tendencias globales sobre la ingeniería del microambiente de las semillas, donde el uso de bioestimulantes bacterianos optimiza el establecimiento inicial y la resiliencia vegetal mediante la síntesis de fitohormonas, la fijación biológica de nitrógeno y la mejora en la

solubilización de nutrientes esenciales (Basu et al., 2021; de Andrade et al., 2023). Los resultados de esta investigación no solo confirman el potencial agrobiotecnológico de las PGPR en especies forestales, sino que revelan una respuesta diferencial y especializada según la cepa bacteriana utilizada.

El proceso de germinación y emergencia biológica estuvo fuertemente estimulado por la presencia de los microorganismos, destacándose de manera excepcional el tratamiento T7 (cepa 2/12 al 20 %), el cual alcanzó un porcentaje promedio de germinación del 50,2 %, superando significativamente al grupo control, que registró valores inferiores al 20 %. Desde una perspectiva fisiológica, la superioridad de la cepa 2/12 sugiere una activación metabólica acelerada de las semillas y la inducción de condiciones óptimas para la emergencia. Este patrón interpretativo coincide con lo descrito por Fiodor et al. (2023) respecto a la bioprimación como una estrategia efectiva para mejorar el vigor inicial de las semillas. Asimismo, estudios desarrollados por Batykova et al. (2025) y Mousa et al. (2024) reportaron que la inoculación bacteriana incrementa notablemente las tasas de germinación mediante la producción de auxinas y una mayor disponibilidad de nutrientes. En el caso específico de *G. arborea*, el incremento del éxito germinativo respecto al control valida la aplicabilidad de la cepa 2/12 para contrarrestar las limitaciones físicas o metabólicas intrínsecas de la semilla en condiciones de vivero.

En lo concerniente al desarrollo vegetativo aéreo, se identificó un comportamiento selectivo y altamente eficiente asociado a la cepa 3/14. Las plántulas sometidas a los tratamientos T2, T5 y T8 (vinculados a esta cepa) conformaron el grupo estadísticamente superior en altura, superando la barrera de los 40 cm del grupo control a los 40 días de evaluación. Esta estimulación de la longitud del tallo se atribuye a la capacidad de la cepa 3/14 para favorecer los procesos de división y elongación celular. Esta respuesta morfológica guarda una estrecha relación con la producción de hojas y la acumulación de

biomasa foliar (peso húmedo y seco), variables donde los tratamientos con la cepa 3/14 también manifestaron una superioridad estadística consistente. El incremento coordinado en el aparato foliar expande de forma directa la superficie fotosintética disponible, optimizando la captura de energía y la subsecuente producción de fotoasimilados necesarios para el crecimiento general de la planta, un mecanismo de estimulación fitohormonal y eficiencia fotosintética ampliamente respaldado en la literatura especializada (de Andrade et al., 2023; Khan et al., 2020).

De manera complementaria, el crecimiento radial del tallo y los índices de calidad estructural exhibieron una dinámica distinta, gobernada primordialmente por la cepa 2/12. Los mayores diámetros de tallo se obtuvieron con esta cepa independientemente de la concentración aplicada, distanciándose del tratamiento control, que mostró diámetros inferiores a 0,4 mm. El diámetro del cuello es considerado un indicador crítico de la resistencia mecánica y la acumulación de biomasa estructural (Mousa et al., 2024). Al integrar esta variable con la altura mediante el índice de robustez, el tratamiento T1 (cepa 2/12) alcanzó los valores más altos, superando el umbral de 7,0. Este equilibrio entre el crecimiento longitudinal y el desarrollo radial es fundamental en la producción forestal; un índice de robustez elevado refleja plantas morfológicamente equilibradas y compactas, disminuyendo el riesgo de daño mecánico y maximizando el potencial adaptativo y las probabilidades de supervivencia post-trasplante en campo (Mousa et al., 2024).

A nivel subterráneo, el desarrollo del sistema radicular a los 40 días reflejó una marcada sensibilidad a los tratamientos biológicos, donde el tratamiento T8 (cepa 3/14) indujo la mayor longitud de la raíz principal, duplicando ampliamente el desempeño del control (inferior a 13,2 cm). La elongación radicular inducida por las PGPR se asocia directamente con la secreción de ácido indolacético (AIA) y la facilitación en la absorción de agua y minerales (Batykova et al., 2025; de Andrade et al., 2023). Un sistema radicular

vigoroso y profundo incrementa la capacidad de exploración del sustrato, lo cual mitiga los efectos adversos asociados a estreses ambientales mediante el fortalecimiento de las interacciones benéficas en la rizosfera (Gul et al., 2023; Mousa et al., 2024). La consistencia de la cepa 3/14 para promover tanto la biomasa aérea como la longitud radicular (particularmente en T8) evidencia su alto valor agronómico para el manejo ex situ de esta especie forestal.

A pesar de los resultados positivos, deben reconocerse ciertas limitaciones metodológicas en este estudio. Las evaluaciones se circunscribieron a una escala temporal de 40 días bajo condiciones controladas de vivero, lo que restringe la extrapolación directa de los datos hacia escenarios de plantación forestal definitiva, donde factores bióticos y abióticos fluctuantes pueden comprometer la viabilidad y competitividad de las cepas introducidas (Mousa et al., 2024). Por lo tanto, se sugiere con prudencia interpretar estos hallazgos como un indicador de éxito en el establecimiento temprano. Futuras líneas de investigación deberán orientarse a evaluar la persistencia de las cepas 2/12 y 3/14 en la rizosfera a mediano y largo plazo, así como el diseño de consorcios bacterianos duales que busquen sinergizar la capacidad germinativa y de robustez de la primera con la eficiencia fotosintética y radicular de la segunda.

Conclusiones

La inoculación con PGPR mejoró significativamente la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas de *Gmelina arborea*, evidenciando su potencial como herramienta biotecnológica para la producción de material vegetal de calidad.

Los resultados confirman que las cepas evaluadas presentan efectos específicos sobre distintos atributos morfológicos, por lo que su uso representa una alternativa prometedora para fortalecer el establecimiento y vigor inicial de *G. arborea* en vivero.

Referencias bibliográficas

- Chávez, K.; Guato, J.; Peñafiel, M.; et al. 2018. Bacterias fluorescentes productoras de metabolitos antagónicos de cultivares nativos de *Musa* sp. y su diversidad filogenética al gen ARNr 16S. *Agricultural Sciences* 11: 17–29.
- King, E., Ward, M., Raney, D. 1954. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 44(2), 301–307.
- Macías-Holguín, C. J., Canchignia-Martínez, H. F., Delgado-Basurto, V. D., Paucar-Nieto, F. P., Arellano-Ibarra, K. V., & Cedeño-Moreira, Á. V. (2023). Efectos de la co-inoculación de Bioformulados (PGPR's) sobre el porcentaje de germinación y promover el crecimiento en plántula de papaya (*Carica papaya* L.). *Manglar*, 20(2), 149-155.
- Arumugam, K., Mahalingam, L., Nair, S. P., Chacko, J. V. P., Annamalai, M., & Arunachalam, M. K. (2024). Establishment of *Gmelina arborea* plantation in an uncultivated farmland inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria: Afforestation with *Gmelina arborea*. *Reforesta*, (17), 18-31.
- Glick, B. R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 2012, DOI: 10.6064/2012/963401
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586. doi.org/10.1023/A:1026037216893
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Ledeá-Rodríguez, J. L., [Resto de los autores no proporcionados en los insumos]. (2020). [Datos bibliográficos faltantes en los insumos].
- Mohanty, P., Singh, P. K., Chakraborty, D., Mishra, S., & Pattnaik, R. (2021). Insight into the role of PGPR in sustainable agriculture and environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Artículo 667150. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667150>
- Pérez-García, L. A., Sáenz-Mata, J., Fortis-Hernández, M., Navarro-Muñoz, C. E., Palacio-Rodríguez, R., & Preciado-Rangel, P. (2023). Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings. *Agronomy*, 13(2), 315. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020315>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Batykova, Z., Pidlisnyuk, V., Kistabayeva, A., Ust'ak, S., Savitskaya, I., Saidullayeva, L., & Mamirova, A. (2025). Isolation and screening of the novel multi-trait strains
-

for future implications in phytotechnology. *Microorganisms*, 13(8), 1902. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13081902>

Bugueño-Guerrero, F. I., Catalán-Barrera, O., & Carballo-Sánchez, M. P. (2024). Effect of a plant growth-promoting rhizobacteria consortium to promote growth in lettuce (*Lactuca sativa* L.) and chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Mexican Journal of Biotechnology*, 9(2), 19–33. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2024.9.2.19>

Fiodor, A., Ajijah, N., Dziewit, Ł., & Pranaw, K. (2023). Biopriming of seed with plant growth-promoting bacteria for improved germination and seedling growth. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1142966. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1142966>

Gul, F., Khan, I. U., Rutherford, S., Dai, Z.-C., Li, G., & Du, D.-L. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria and biochar production from *Parthenium hysterophorus* enhance seed germination and productivity in barley under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1175097. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1175097>

De Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), Artículo 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>

Mousa, S., Nyaruaba, R., Yang, H., & Wei, H. (2024). Engineering seed microenvironment with embedded bacteriophages and plant growth promoting rhizobacteria. *BMC Microbiology*, 24, Artículo 503. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03657-y>

Batykova et al. (2025). (Información bibliográfica incompleta en los insumos; retenida bajo los parámetros originales del manuscrito del autor).

Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R., Reddy, M., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>

Bugueño-Guerrero et al. (2024). (Información bibliográfica incompleta en los insumos; retenida bajo los parámetros originales del manuscrito del autor).

De Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>

Fiodor et al. (2023). (Información bibliográfica incompleta en los insumos; retenida bajo los parámetros originales del manuscrito del autor).

Gul et al. (2023). (Información bibliográfica incompleta en los insumos; retenida bajo los parámetros originales del manuscrito del autor).

Khan, S., Shahid, M., Khan, M. S., Syed, A., Bahkali, A. H., Elgorban, A. M., & Pichtel, J. (2020). Fungicide-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria mititgate

- physiological disruption of white radish caused by fungicides used in the field cultivation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 7251. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197251>
- Mousa, S., Nyaruaba, R., Yang, H., & Wei, H. (2024). Engineering seed microenvironment with embedded bacteriophages and plant growth promoting rhizobacteria. *BMC Microbiology*, 24(1), 503. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03657-y>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. and Robledo, C.W. (2011) *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Alcantara, J., Acero, J., Alcántara, J., & Sánchez, R. (NOVA de 2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en. 17 (32)(109-129).
- Angulo, V., Sanfuentes, E., Rodríguez, F., & Sossa, Y. (2014). Caracterización de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de *Eucalyptus nitens*. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(4)(338–347). doi:[https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70093-8](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70093-8)
- Barreto, D., Valero, N., Muñoz, A., & Peralta, A. (2007). Efecto de Microorganismos Rizosféricos sobre germinación y crecimiento temprano de *Anacardium Excelsum*. *Zonas Áridas*, 11(1)(240–250).
- Castro, S., & Roa, C. (2006). Bacterias endofitas de *Cordia alliodora* oken y *Tabebuia rosea bertold* d.c: Potencial como promotoras de crecimiento vegetal en la propagación de su hospedero.
- Chaudhary , T., & Shukla , P. (2019). Bioinoculants for Bioremediation Applications and Disease Resistance: Innovative Perspectives . *Indian J Microbiol*, 2(59), 129-136.
- Díaz, K. (2019). Identificación de genes de respuesta a sequía, en hojas y raíces de un genotipo de *eucalyptus globulus* tolerante al estrés. Universidad de Concepción Dirección de Postgrado Facultad de Ciencias Forestales-Programa de Doctorado en Ciencia Forestales. Universidad de Concepción.
- García, J., Probanza, A., Ramos, B., Barriuso, J., & Manero, F. (2004). Effects of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) and *Sinorhizobium fredii* on biological nitrogen fixation, nodulation and growth of *Glycine max* cv. Osumi. *Plant and Soil*, 267(1-2)(143-153.).
- Gomes, D., Radi, J., & Silva, G. (2018). Growth-promoting bacteria change the development of aerial part and root system of canola. *Ciencias Agrarias*, 39(6), 2375-2384.
- González, A., Almaraz, J., Ferrera, R., Rodríguez, M., Taboada, O., Trinidad, A., . . . Arteaga, R. (2017). Caracterización y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de chile poblano (*capsicum annuum* l.). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(3)(463–474). doi:<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.09>
- Hedden , P., & Kamiya, Y. (1997). Gibberellin biosynthesis: enzymes, genes and their
-

regulation, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol.*, 48(431–460.).

Jenik , P., & Barton, M. (2005). Surge and destroy: the role of auxin in plant embryogenesis. *Development* , 132(3577-3585).

Krishnan, P., Rajapandian, S., & Selvi, T. (2004). Influence of inoculation of biofertilizers on growth and biomass productivity of *Simarouba Glauca* seedlings. *My forest*, 40(2)(197-202.).

Lavania, M., Chauhan, P., Chauhan, S., Singh, H., & Nautiyal, C. (2006). Induction of plant defense enzymes and phenolics by treatment with plant growth–promoting rhizobacteria *Serratia marcescens* NBRI1213. *Current microbiology*, 52(5)(363-368).

Ludwig-Müller , J., & Cohen, J. (2002). Identification and quantification of three active auxins in different tissues of *Tropaeolum majus*. *Physiologia Plantarum* , 115 (320–329).

Maharana, R., Dobriyal, M., Behera, L., & Sukhadiya, M. (2018). Enhancement of seedling vigour through biofertilizers application in gamhar (*Gmelina arborea* Roxb.). *Ijcs*, 6(5)(54–60.).

Rodríguez, D. A. (2008). *Indicadores de calidad de planta forestal*. México: Mundi Prensa.

Rueda, E., Villegas, J., Gerlach, L., Tarazón, M., Murillo, B., García, J., & Preciado, P. (2009). Efecto de la inoculación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal sobre la germinación de *Salicornia bigelovii*. *Terra Latinoamericana*, 27(4)(345-354).
