

Artículo Científico

Rizobacterias promotoras del crecimiento como estrategia para mejorar la tolerancia al estrés hídrico en banano (*Musa spp.*) durante vivero

*Growth-promoting rhizobacteria as a strategy to improve water stress tolerance in banana (*Musa spp.*) during nursery*

 Loza-Ormaza, Maholy Rocio ¹
 <https://orcid.org/0009-0005-1363-3610>
 maholy.loza2015@uteq.edu.ec
 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo.

 Fuentes-Núñez, Fabricio Rolando ²
 <https://orcid.org/0009-0005-9260-7831>
 rfuentesn@uteq.edu.ec
 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.

 Tubun-Vargas, Anthony Lizandro ³
 <https://orcid.org/0009-0002-7791-6087>
 atubun@uagraria.edu.ec
 Universidad Agraria del Ecuador, Milagro, Ecuador.

 Espinoza-Roca, Marjorie D. ⁴
 <https://orcid.org/0009-0002-8524-206X>
 marjorie.espinoza@iniap.gob.ec
 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador, Mocache.

 Venegas-Vera, Johana Jazmín ⁵
 <https://orcid.org/0009-0004-8134-9067>
 venegas.johajazmin11@gmail.com
 Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador, Jipijapa.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n3/247>

Resumen: El cultivo de *Musa spp.* enfrenta pérdidas crecientes por la irregularidad de las precipitaciones en las zonas productoras tropicales, lo que hace necesario explorar alternativas biológicas que reduzcan la dependencia del riego sin comprometer el desarrollo de las plántulas. Se evaluó el efecto de un consorcio de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, con capacidad de formar biofilms en la rizosfera, sobre el desarrollo morfofisiológico de plántulas de banano variedad Williams sometidas a tres niveles de disponibilidad hídrica durante la fase de vivero. Se aplicó un diseño completamente al azar con seis tratamientos y tres repeticiones, evaluando altura, diámetro del pseudotallo, número de hojas, contenido relativo de clorofila y peso fresco de raíz. Los tratamientos sin inoculación bacteriana superaron consistentemente a los inoculados en todas las variables con diferencia estadística, alcanzando la mayor expresión bajo el nivel de humedad menos restrictivo. La inoculación no indujo mejoras detectables en ninguna de las variables morfológicas ni fotosintéticas evaluadas. Estos resultados sugieren que, en las condiciones ensayadas, el desarrollo de las plántulas dependió principalmente de mecanismos fisiológicos intrínsecos frente al déficit hídrico y no de la actividad del consorcio bacteriano.

Palabras clave: PGPR, micobacterias, biofilms, bioestimulante, estrés hídrico.



Check for updates

Received: 26/Jun/2026
Accepted: 23/Jul/2026
Published: 14/Ago/2026

Cita:
Loza-Ormaza, M. R., Fuentes-Núñez, F. R., Tubun-Vargas, A. L., Espinoza-Roca, M., & Venegas-Vera, J. J. (2026). Rizobacterias promotoras del crecimiento como estrategia para mejorar la tolerancia al estrés hídrico en banano (*Musa spp.*) durante vivero. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 4(3), 442-455. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n3/247>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2026. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The cultivation of *Musa* spp. is facing increasing losses due to erratic rainfall in tropical growing regions, making it necessary to explore biological alternatives that reduce dependence on irrigation without compromising seedling development. The effect of a consortium of plant-growth-promoting rhizobacteria, capable of forming biofilms in the rhizosphere, on the morphophysiological development of Williams banana seedlings subjected to three levels of water availability during the nursery phase was evaluated. A completely randomised design was used, comprising six treatments and three replicates, with assessments of height, pseudostem diameter, number of leaves, relative chlorophyll content and fresh root weight. The treatments without bacterial inoculation consistently outperformed the inoculated treatments for all variables with statistical significance, achieving the highest performance under the least water-limiting conditions. Inoculation did not induce any detectable improvements in any of the morphological or photosynthetic variables assessed. These results suggest that, under the conditions tested, seedling development depended primarily on intrinsic physiological mechanisms in response to water deficit, rather than on the activity of the bacterial consortium.

Keywords: PGPR, mycobacteria, biofilms, biostimulant, water stress.

1. Introducción

El banano (*Musa* spp.) constituye uno de los rubros agroexportadores de mayor peso para la economía ecuatoriana, sosteniendo cadenas de comercialización que involucran a miles de productores y que resultan altamente sensibles a cualquier factor que comprometa la productividad del cultivo (Álvarez et al., 2022). Entre esos factores, la irregularidad de las precipitaciones asociada al cambio climático ha intensificado la ocurrencia de episodios de déficit hídrico en las principales zonas bananeras, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas biológicas que reduzcan la dependencia del riego sin afectar el desarrollo de las plántulas.

El estrés hídrico compromete procesos fisiológicos determinantes para el desarrollo vegetal, entre ellos la actividad fotosintética, la conductancia estomática y la estabilidad de los pigmentos fotosintéticos, cuya afectación se refleja de manera directa en el contenido de clorofila de las plantas sometidas a restricción de agua (Yetik & Candoğan, 2023; Zhang et al., 2024). Asimismo, el déficit hídrico modifica la comunidad microbiana del suelo y las enzimas asociadas a su actividad, alterando el entorno en el que se desenvuelven tanto la planta como su microbiota rizosférica (Bogati & Walczak, 2022), y puede inducir respuestas compensatorias en la parte aérea de especies leñosas y herbáceas, como se ha documentado en *Quercus ilex* bajo la acción combinada de estrés hídrico y microorganismos benéficos (Cabrera-Puerto et al., 2023).

Frente a este panorama, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) se han consolidado como una herramienta biotecnológica de interés creciente para mitigar los efectos del estrés abiótico en distintos cultivos. Se ha reportado su capacidad de mejorar la tolerancia a la sequía mediante la aplicación conjunta con biochar en maíz (Anwar et al., 2024), de favorecer respuestas fisiológicas y anatómicas positivas frente al déficit hídrico en cebolla (Lestari & Siswanti, 2024), de optimizar el estado bioquímico, nutricional y fisiológico de plantas de fresa bajo restricción de agua mediante consorcios microbianos diseñados (Pérez-Moncada et al., 2024), y de sostener la calidad de la respuesta de la quinua a la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento bajo condiciones de estrés hídrico (Hosseini & Bostani, 2024).

En sentido inverso, también se ha documentado que el déficit hídrico puede modificar la estructura de la comunidad microbiana rizosférica y los rasgos funcionales de las plantas, evidenciando que la relación planta-microorganismo bajo sequía no es unidireccional ni necesariamente favorable (Liu et al., 2024). En el ámbito específico de la biocaptación de nutrientes bajo estas condiciones, se ha profundizado además en la valoración de la fijación biológica de nitrógeno por bacterias rizosféricas y caulósfericas aisladas de maíz (Reyes-Nava et al., 2025), y en el aislamiento y la caracterización taxonómica y funcional de consorcios de PGPR en semillas de maní (Bigatton et al., 2025), evidenciando el interés creciente por caracterizar en detalle el potencial biotecnológico de estas cepas antes de su aplicación en campo.

En el cultivo de banano en particular, la evidencia reciente sobre el uso de bioinsumos microbianos en fase de vivero ha comenzado a expandirse en distintas direcciones. Se ha estudiado la actividad antagonista de PGPR frente al nematodo fitoparásito *Pratylenchus* spp. en *Musa paradisiaca* (Crespo et al., 2024), el efecto de *Bacillus* sp. y *Trichoderma* spp. sobre el desarrollo de plántulas de banano en etapa de vivero (Guerrero et al., 2025), el control biológico de *Radopholus similis* mediante bacterias y hongos endófitos (Rodríguez-Zamora et al., 2025), el uso de biofertilizantes líquidos a base de sargazo para el cultivo bananero en sistemas de agricultura familiar de pequeña escala (Rodríguez-Rodríguez et al., 2025), y el efecto de la aplicación de fósforo y calcio vía drench sobre el desarrollo de plantines de banano (Heredia-Pinos et al., 2025).

De forma paralela, en otros cultivos frutícolas tropicales se ha explorado el uso combinado de biocarbón y microorganismos para mejorar la resiliencia de plántulas de café frente al estrés hídrico y enfermedades (Alvarado-Picado et al., 2025), lo que confirma una tendencia regional hacia la búsqueda de bioinsumos multifuncionales aplicables en vivero. Pese al volumen creciente de evidencia sobre el potencial de las PGPR en distintos cultivos, la revisión sistemática más reciente sobre estas rizobacterias señala que persisten vacíos importantes respecto a la consistencia de su efecto según la especificidad cepa-hospedero y las condiciones ambientales de aplicación (Hasan et al., 2024), lo cual resulta especialmente relevante cuando se trata de cepas con capacidad de formar biofilms en la rizosfera, un rasgo funcional que se

evalúa cada vez con mayor frecuencia al caracterizar nuevos aislados de PGPR (Bigatton et al., 2025). Por ello, el presente estudio se planteó como objetivo determinar el nivel de estrés hídrico en plántulas de banano variedad Williams durante la fase de vivero bajo la aplicación de un consorcio de rizobacterias con capacidad de formación de biofilms.

2. Materiales y métodos

La fase experimental se desarrolló en las instalaciones de laboratorio e invernadero del Campus Experimental "La María", perteneciente a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, localizado en el kilómetro 7,5 de la vía Quevedo-Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador, en las coordenadas 01°04'48,6" de latitud sur y 79°30' de longitud oeste, con una altitud elipsoidal de 67 metros. La investigación se abordó desde un enfoque experimental, dado que se manipularon de forma controlada tanto el nivel de disponibilidad hídrica del sustrato como la presencia o ausencia de inoculación bacteriana. Para la interpretación de los resultados se recurrió al método deductivo, partiendo de los principios generales de la fisiología vegetal, el estrés hídrico y la acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento para inferir cómo la interacción entre ambos factores condicionó el comportamiento observado en cada tratamiento. De manera complementaria, se aplicó un método analítico que permitió descomponer los resultados de cada variable evaluada, identificar patrones de respuesta y establecer relaciones entre ellas.

La información primaria del estudio provino directamente de las mediciones morfológicas y evaluaciones fisiológicas registradas durante el ensayo bajo condiciones controladas de vivero, mientras que la información secundaria se obtuvo de la revisión de literatura científica indexada, libros, informes técnicos y boletines especializados en fisiología vegetal, estrés hídrico y uso de rizobacterias, la cual sirvió de sustento teórico y de referencia para contrastar los hallazgos obtenidos.

El estudio consideró un único factor experimental, resultante de la combinación de tres niveles de humedad del sustrato, establecidos en 75, 50 y 25 por ciento de la capacidad de campo, con la presencia o ausencia de inoculación de un consorcio bacteriano integrado por las cepas *Pseudomonas fluorescens* CHA0, *Pseudomonas veronii* R4, *Acinetobacter calcoaceticus* BMR 2-12 y *Pseudomonas putida* BMR 2-4, seleccionadas por su reconocido potencial promotor del crecimiento vegetal y su participación en la tolerancia a estrés abiótico. Esta combinación dio origen a seis tratamientos: humedad del 75 por ciento con y sin inoculación, humedad del 50 por ciento con y sin inoculación, y humedad del 25 por ciento con y sin inoculación, cada uno de ellos evaluado bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones, para un total de dieciocho unidades experimentales y doce grados de libertad asignados al error experimental.

Como material vegetal se emplearon plántulas de banano variedad Williams procedentes de un vivero certificado, previamente inspeccionadas de forma visual para descartar ejemplares con síntomas de estrés, daño mecánico o presencia de patógenos, de manera que la variabilidad experimental atribuible al material de partida se redujera al mínimo. El sustrato se preparó combinando suelo agrícola tamizado con tamo de arroz en proporción volumétrica de tres a uno, empleando el tamo como estructurante para mejorar la aireación, la porosidad y el drenaje. Dicho sustrato se dispuso en fundas de polietileno de veinte por diez pulgadas, llenadas hasta aproximadamente el sesenta por ciento de su capacidad y compactadas ligeramente para evitar bolsas de aire y asegurar un buen contacto raíz-sustrato.

El trasplante se efectuó tres días después de la adquisición de las plántulas, bajo sombra parcial, con el fin de favorecer la aclimatación y reducir el estrés por radiación durante el establecimiento. El riego comenzó dos días después del trasplante, una vez observados signos de adaptación al nuevo sustrato, ajustando desde ese momento la frecuencia y el volumen de agua aplicado según el nivel de capacidad de campo correspondiente a cada tratamiento. El consorcio bacteriano se preparó en solución acuosa a razón de veinte mililitros de inóculo por cada ochocientos mililitros de agua, aplicándose en cuatro ocasiones, a los veinticinco, cincuenta, setenta y cinco y cien días después del trasplante, coincidiendo con etapas clave del desarrollo vegetativo de la planta.

Se evaluaron cinco variables de respuesta. La altura de planta se registró en centímetros a los diez días posteriores a cada aplicación bacteriana, midiendo desde el nivel del cuello hasta el punto más alto del brote apical con un flexómetro metálico de precisión de un milímetro, evitando la curvatura natural del follaje. El diámetro del pseudotallo se determinó en milímetros a una altura fija de diez centímetros desde la superficie del sustrato, empleando un calibrador digital de precisión de una centésima de milímetro colocado perpendicularmente al eje del tallo. El número de hojas se contabilizó de forma directa considerando desde la hoja cigarro en desarrollo hasta la última hoja completamente expandida y funcional, excluyendo hojas senescentes o necróticas.

El contenido relativo de clorofila se estimó con un medidor portátil de precisión de una unidad, tomando tres lecturas por hoja en las regiones basal, media y apical de la tercera hoja completamente expandida, en horario matutino comprendido entre las ocho y las diez, a los treinta, sesenta y noventa días después del trasplante. Finalmente, el peso fresco del sistema radicular se determinó a los quince días posteriores a la última aplicación bacteriana, extrayendo cuidadosamente las plantas, lavando las raíces para eliminar residuos de sustrato, secándolas superficialmente con papel absorbente y pesándolas en una balanza analítica de precisión milesimal.

Previo al análisis de varianza se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Cumplidos estos supuestos, se aplicó un

análisis de varianza para detectar diferencias entre tratamientos y, en los casos donde se identificaron diferencias estadísticamente significativas, se efectuó la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del cinco por ciento. El procesamiento estadístico se realizó con el programa InfoStat, mientras que la elaboración de las representaciones gráficas correspondientes a altura de planta, diámetro del pseudotallo y número de hojas se llevó a cabo con el software SigmaPlot.

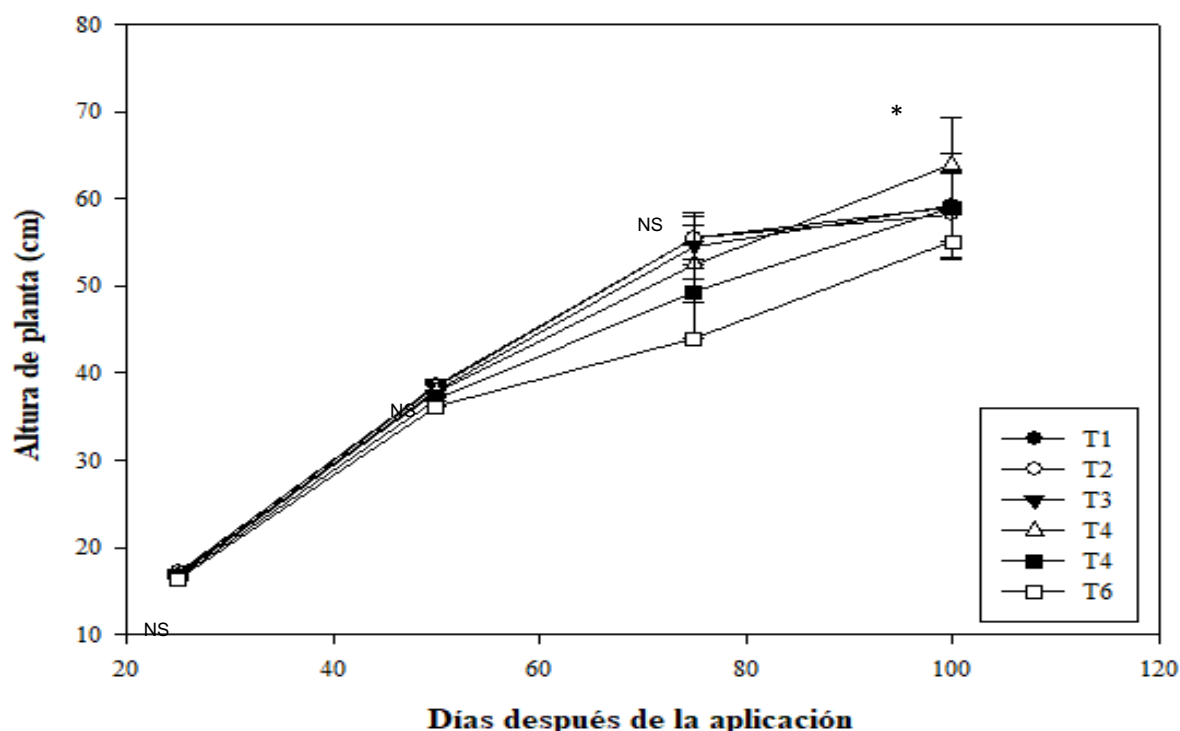
3. Resultados

3.1. Altura de planta

En la altura de planta no se registraron diferencias entre tratamientos a los veinticinco, cincuenta y setenta y cinco días después del establecimiento. A los cien días, en cambio, surgieron diferencias estadísticas: el tratamiento con 75 % de capacidad de campo sin inoculación alcanzó el mayor valor, con 73,79 centímetros, seguido por el mismo nivel hídrico con inoculación (63,79 centímetros) y por el 50 % sin inoculación (62,90 centímetros); les siguieron el 25 % sin inoculación (55,08 centímetros) y el 50 por ciento con inoculación (54,26 centímetros), mientras que el menor valor correspondió al 25 % con inoculación, con 44,99 centímetros, tal como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Altura de planta en plántulas de Musa spp. después de la aplicación los tratamientos



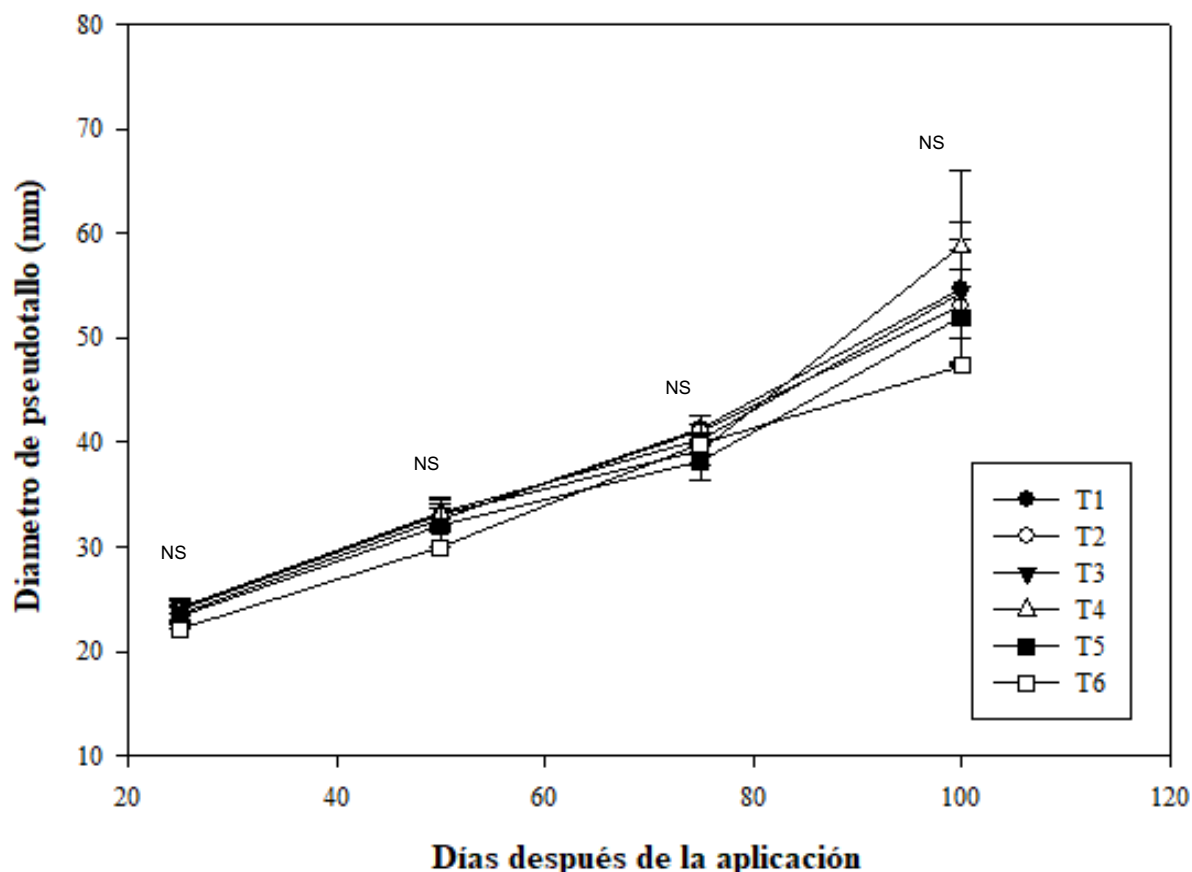
Nota: T1: 75% de estrés hídrico con PGPR; T2: 50% de estrés hídrico con PGPR; T3: 25% de estrés hídrico con PGPR; T4: 75% de estrés hídrico sin PGPR; T5: 50% de estrés hídrico sin PGPR; T6: 25% de estrés hídrico sin PGPR. NS: no significativo; *: diferencia significativa según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Autores, 2026).

3.2. Diámetro del pseudotallo

El diámetro del pseudotallo no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos en ninguno de los cuatro momentos de evaluación, con coeficientes de variación que oscilaron entre 12,35 y 19,65 por ciento a lo largo del ensayo, como se aprecia en la Figura 2.

Figura 2

Diámetro del pseudotallo en plántulas de Musa spp. después de la aplicación de los tratamientos



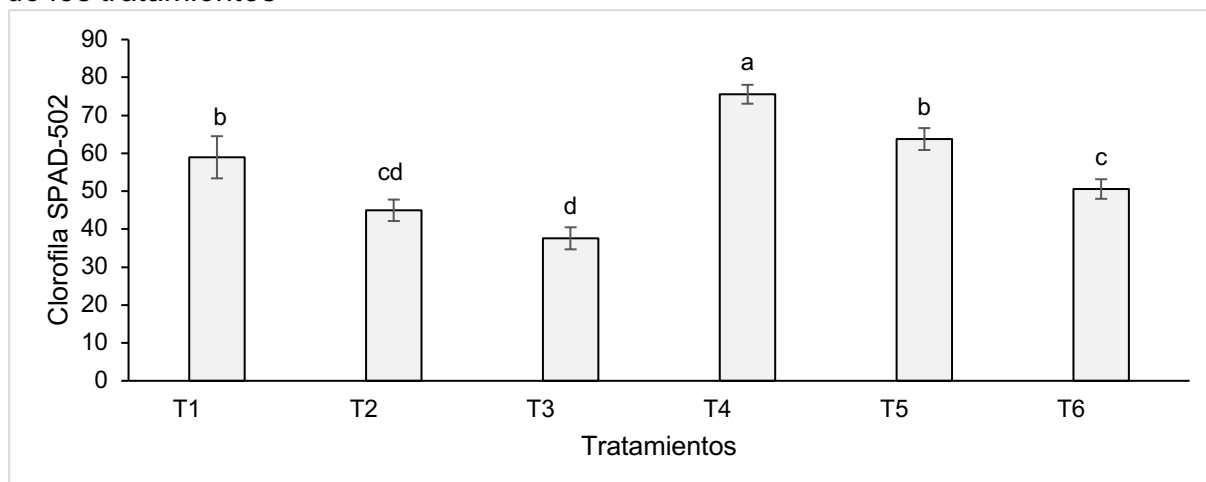
Nota: T1: 75% de estrés hídrico con PGPR; T2: 50% de estrés hídrico con PGPR; T3: 25% de estrés hídrico con PGPR; T4: 75% de estrés hídrico sin PGPR; T5: 50% de estrés hídrico sin PGPR; T6: 25% de estrés hídrico sin PGPR. NS: no significativo; *: diferencia significativa según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Autores, 2026).

3.3. Contenido de clorofila

El contenido de clorofila sí presentó diferencias significativas: el tratamiento con 75 % de capacidad de campo sin inoculación registró el mayor contenido (75,57 unidades), seguido por el 50 % sin inoculación (63,76) y el 75 % con inoculación (58,95); el 25 % sin inoculación alcanzó 50,58 unidades, mientras que los tratamientos con inoculación en 50 y 25 % de capacidad de campo registraron los valores más bajos, con 44,97 y 37,58 unidades respectivamente, con un coeficiente de variación del 6,12 % (Figura 3).

Figura 3

Contenido de clorofila (SPAD-502) en plántulas de Musa spp. después de la aplicación de los tratamientos



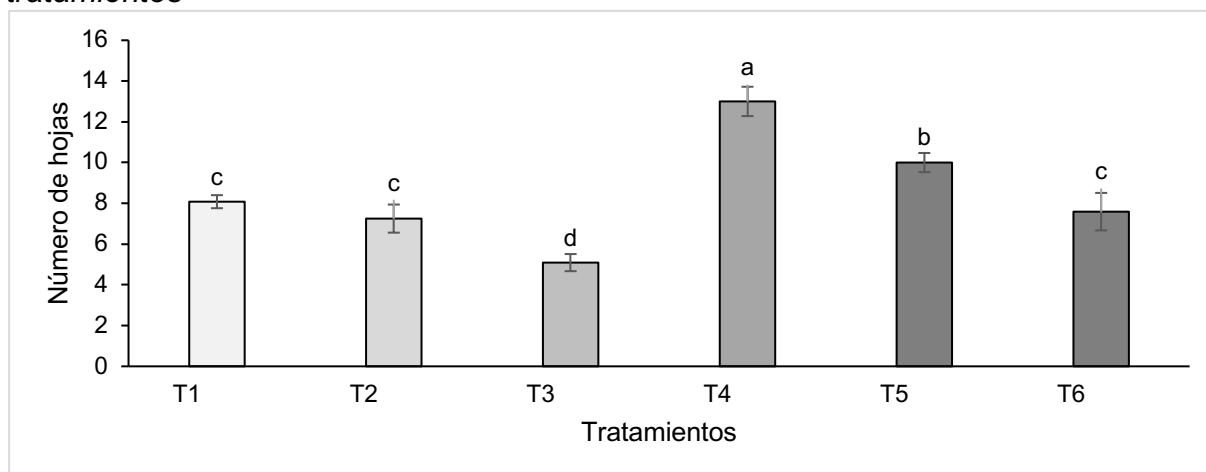
Nota: T1: 75% de estrés hídrico con PGPR; T2: 50% de estrés hídrico con PGPR; T3: 25% de estrés hídrico con PGPR; T4: 75% de estrés hídrico sin PGPR; T5: 50% de estrés hídrico sin PGPR; T6: 25% de estrés hídrico sin PGPR. Las barras representan las medias aritméticas de cada tratamiento; la línea sobre cada barra corresponde a la desviación estándar; letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Autores, 2026).

3.4. Número de hojas

El número de hojas también se diferenció estadísticamente entre tratamientos: el 75 por ciento sin inoculación presentó el mayor número, con trece hojas, seguido por el 50 por ciento sin inoculación con diez; los tratamientos con 25 % sin inoculación, 50 por ciento con inoculación y 75 % con inoculación se ubicaron en un rango intermedio de 7,25 a 8,08 hojas, mientras que el 25 % con inoculación presentó el valor más bajo, con 5,09 hojas, con un coeficiente de variación del 7,33 % (Figura 4).

Figura 4

Número de hojas en plántulas de Musa spp. después de la aplicación de los tratamientos



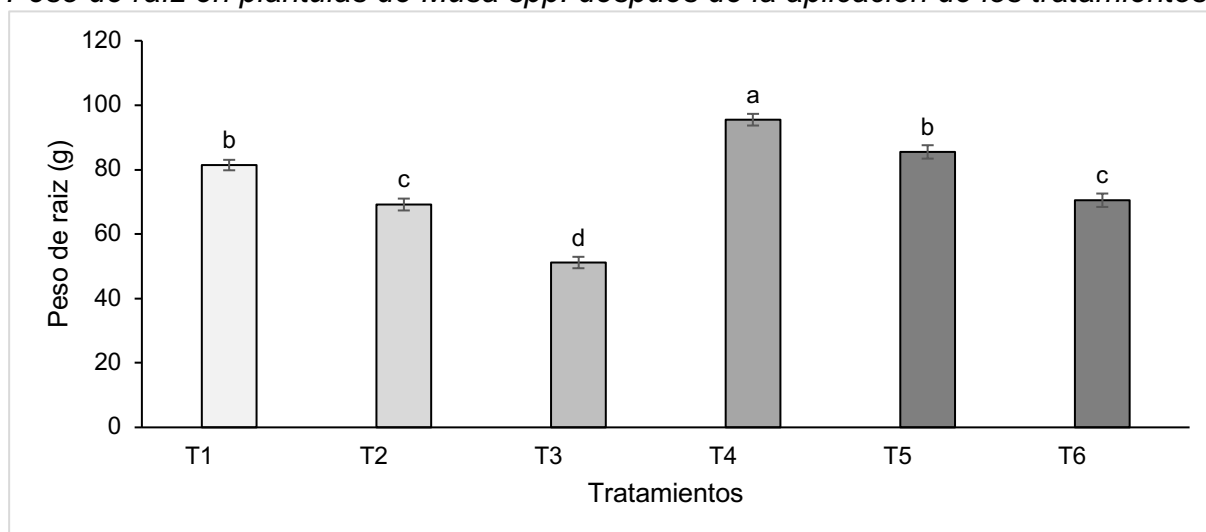
Nota: T1: 75% de estrés hídrico con PGPR; T2: 50% de estrés hídrico con PGPR; T3: 25% de estrés hídrico con PGPR; T4: 75% de estrés hídrico sin PGPR; T5: 50% de estrés hídrico sin PGPR; T6: 25% de estrés hídrico sin PGPR. Las barras representan las medias aritméticas de cada tratamiento; la línea sobre cada barra corresponde a la desviación estándar; letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Autores, 2026).

3.5. Peso fresco de raíz

El peso fresco de raíz evidenció diferencias significativas, con el mayor valor en el tratamiento de 75 % sin inoculación (95,50 gramos), seguido por el 50 % sin inoculación (85,50 gramos) y el 75 % con inoculación (81,42 gramos); el 25 % sin inoculación alcanzó 70,50 gramos y el 50 por ciento con inoculación 69,17 gramos, mientras que el menor peso correspondió al 25 % con inoculación, con 51,17 gramos, y un coeficiente de variación del 2,48 % (Figura 5).

Figura 5

Peso de raíz en plántulas de Musa spp. después de la aplicación de los tratamientos



Nota: T1: 75% de estrés hídrico con PGPR; T2: 50% de estrés hídrico con PGPR; T3: 25% de estrés hídrico con PGPR; T4: 75% de estrés hídrico sin PGPR; T5: 50% de estrés hídrico sin PGPR; T6: 25% de estrés hídrico sin PGPR. Las barras representan las medias aritméticas de cada tratamiento; la línea sobre cada barra corresponde a la desviación estándar; letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) (Autores, 2026).

4. Discusión

El comportamiento de la altura de planta durante las primeras etapas de evaluación, sin diferencias detectables entre tratamientos, es coherente con la idea de que el crecimiento temprano de las plántulas depende principalmente de reservas metabólicas internas y no tanto de factores externos como la microbiota rizosférica, tal como señalan Maquen-Perleche et al. (2023). Esta condición cambia hacia el final del ciclo evaluado, cuando la diferenciación estadística se hace evidente y los tratamientos sin inoculación superan a los inoculados, un patrón que sugiere que la respuesta observada responde más a mecanismos fisiológicos propios de la planta frente al déficit hídrico que a la acción bacteriana.

El mayor crecimiento en altura bajo el tratamiento con menor restricción hídrica y sin inóculo es consistente con lo descrito por Cabrera-Puerto et al. (2023), quienes documentan que niveles moderados de estrés hídrico pueden inducir un crecimiento compensatorio en la parte aérea mediante la redistribución de fotoasimilados y cambios en la concentración de fitohormonas como el ácido indolacético y las

giberelinas, priorizando la elongación como estrategia para optimizar la captación de luz. La ausencia de un efecto positivo de la inoculación, por su parte, contrasta con lo reportado por Prisa (2020) para *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*, y podría explicarse por factores señalados por Bigatton et al. (2025), como la especificidad de la cepa, la densidad del inóculo y su capacidad real de colonización radicular bajo las condiciones ensayadas. En la misma línea, Hosseini y Bostani (2024) advierten que la interacción planta-rizobacteria bajo estrés hídrico puede volverse inconsistente cuando las condiciones edáficas restringen procesos clave como la fijación de nitrógeno o la solubilización de fósforo, lo que respalda la hipótesis de una actividad microbiana limitada en este ensayo.

La estabilidad del diámetro del pseudotallo frente a los distintos niveles de humedad y a la inoculación bacteriana indica que esta variable estructural es menos sensible que la altura a los factores evaluados, en concordancia con Mon et al. (2021), quienes vinculan su desarrollo más estrechamente con la acumulación de biomasa foliar que con variaciones hídricas moderadas. Bogati y Walczak (2022) explican además que, bajo déficit hídrico, muchas especies priorizan la elongación sobre el engrosamiento estructural, lo que ayuda a entender por qué el pseudotallo no mostró la misma sensibilidad que la altura o el peso de raíz. La falta de respuesta a la inoculación en esta variable difiere de lo hallado por Beltrán-Acosta et al. (2022) con *Pseudomonas* y *Bacillus*, discrepancia que, según Reyes-Nava et al. (2025), puede atribuirse a limitaciones en la colonización rizosférica bajo baja disponibilidad de agua. Rodríguez-Zamora et al. (2025) refuerzan esta interpretación al señalar que el crecimiento radial del tallo suele ser uno de los parámetros menos sensibles al estrés hídrico, restándole utilidad como indicador temprano de tolerancia.

El menor contenido de clorofila en los tratamientos inoculados frente a los no inoculados resulta llamativo, pues se aparta de lo esperado según Yetik y Candoğan (2023), quienes consideran este parámetro un indicador directo del estado fisiológico y de la capacidad fotosintética de la planta. El mantenimiento de valores más altos en los tratamientos sin bacteria, particularmente bajo menor restricción hídrica, sugiere que las plántulas conservaron la integridad de sus cloroplastos mediante mecanismos antioxidantes propios, en línea con lo descrito por Zhang et al. (2024). La respuesta negativa asociada a la inoculación contrasta con los hallazgos de Anwar et al. (2024), y podría deberse, según Clément et al. (2023), a una actividad microbiana reducida bajo estrés hídrico severo o a una competencia por recursos en la rizosfera, mientras que Pérez-Moncada et al. (2024) atribuyen esta clase de resultados a un incremento del estrés oxidativo que termina degradando los pigmentos fotosintéticos cuando no es neutralizado a tiempo.

Un patrón similar se observa en el número de hojas y en el peso de raíz, donde los tratamientos sin inoculación superaron sistemáticamente a los inoculados. Heredia-Pinos et al. (2025) y Jardine et al. (2020) relacionan la tasa de emisión foliar con la actividad meristemática y la disponibilidad de recursos, lo que explicaría que las plantas no inoculadas mantuvieran su dinámica de crecimiento foliar pese a la

restricción hídrica. La menor emisión foliar bajo inoculación se aparta de lo reportado por Guerrero et al. (2025), aunque Rodríguez-Rodríguez et al. (2025) matizan que la respuesta a estas bacterias depende en gran medida de la cepa, la dosis y las condiciones ambientales del ensayo. En cuanto al peso de raíz, el mayor desarrollo radical bajo menor restricción hídrica y sin inóculo coincide con la idea de Lestari y Siswanti (2024) de que la biomasa radical se incrementa como respuesta adaptativa al déficit hídrico, permitiendo explorar un mayor volumen de suelo; Anwar et al. (2024) añaden que esta plasticidad radical es clave para optimizar la relación raíz-parte aérea. La menor respuesta en los tratamientos inoculados difiere de lo señalado por Faisal et al. (2023) sobre la promoción radicular vía auxinas bacterianas, discrepancia que Liu et al. (2024) asocian con una eficiencia decreciente de las rizobacterias cuando el agua disponible no alcanza para sostener su actividad metabólica.

La evidencia reunida en este estudio apunta a que, bajo las condiciones específicas del ensayo, el desarrollo de las plántulas de banano en vivero estuvo gobernado principalmente por mecanismos fisiológicos intrínsecos de tolerancia al déficit hídrico, y no por la acción del consorcio de rizobacterias formadoras de biofilm evaluado, lo que plantea la necesidad de revisar la compatibilidad cepa-hospedero y las condiciones de aplicación en futuros ensayos.

5. Conclusiones

El desarrollo morfológico de las plántulas de banano variedad Williams, expresado en altura, número de hojas y peso fresco de raíz, fue consistentemente mayor en los tratamientos sin inoculación bacteriana frente a los inoculados, con la mejor expresión bajo el nivel de humedad menos restrictivo del ensayo. El diámetro del pseudotallo se mantuvo estable frente a todos los niveles de humedad y frente a la inoculación, confirmando que se trata de una variable de baja plasticidad en fase de vivero y de limitada utilidad como criterio temprano para evaluar tolerancia al estrés hídrico o eficacia de bioinsumos.

El contenido relativo de clorofila no reflejó ningún beneficio atribuible a la inoculación bacteriana; por el contrario, los valores más bajos se registraron sistemáticamente en los tratamientos con consorcio microbiano, lo que sugiere que, bajo las condiciones ensayadas, la actividad fotosintética potencial no se vio favorecida por la presencia de las rizobacterias evaluadas.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Alvarado-Picado, E., Villagra-Mendoza, K., Pérez, J., & Masís-Meléndez, F. (2025). Impact of biochar and microorganisms on coffee seedlings resilience to water stress and diseases. *Terra Latinoamericana*, 43, Artículo e2055. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2055>
- Álvarez Naranjo, L. J., Naranjo Pinela, T. C., Pérez Salazar, J. A., & Carvajal Salgado, A. L. (2022). Cadena de comercialización del banano ecuatoriano. Aproximación de una propuesta de política pública de exportación. *Revista Ñeque*, 5(12), 261–277. <https://doi.org/10.33996/revistaneque.v5i12.79>
- Anwar, T., Qureshi, H., Gull, S., Siddiqi, E. H., Chaudhary, T., & Ali, H. M. (2024). Enhancing *Zea mays* growth and drought resilience by synergistic application of rhizobacteria-loaded biochar (RBC) and externally applied gibberellic acid (GA). *Environmental Technology & Innovation*, 33, Artículo 103517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103517>
- Beltrán-Acosta, C. R., Zapata-Narváez, Y. A., Millán-Montaño, D. A., & Díaz-García, A. (2023). Efecto de *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas migulae* sobre el crecimiento de plántulas de uchuva (*Physalis peruviana* L.) en semillero. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), Artículo 50669. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.50669>
- Bigatton, E. D., Ayoub, I., Castillejo, M. Á., Merlo, C., Vázquez, C., Archilla, M. V., Bruno, M., Martín, M. P., Pizzolitto, R. P., Dubini, L. E., Lucini, E. I., & Haro, R. J. (2025). Plant growth-promoting rhizobacteria on peanut seedlings (*Arachis hypogaea* L.): Isolation, taxonomical, and functional characterization. *Oil Crop Science*, 10(2), 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2025.04.003>
- Bogati, K., & Walczak, M. (2022). The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1), Artículo 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010189>
- Cabrera-Puerto, R. J., Ruiz-Gómez, F. J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2023). Beneficial microorganisms and water stress influence *Quercus ilex* seedlings' response to *Phytophthora cinnamomi* Rands. *Forests*, 14(5), Artículo 870. <https://doi.org/10.3390/f14050870>
- Clément, J., Delisle-Houde, M., Nguyen, T. T. A., Dorais, M., & Tweddell, R. J. (2023). Effect of biostimulants on leafy vegetables (baby leaf lettuce and Batavia lettuce) exposed to abiotic or biotic stress under two different growing systems. *Agronomy*, 13(3), Artículo 879. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030879>
- Crespo Ávila, J. A., Carranza Cárdenas, C. C., Cedeño Moreira, A. V., Vera Benites, L. F., & Chevez Villanueva, M. S. (2024). Actividad antagonista de PGPR en nematodo fitoparásito *Pratylenchus* spp. en *Musa paradisíaca* (*Musa acuminata* × *M. balbisiana*) cv cavendish. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 8(24), 717–728. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i24.297>
- Faisal, M., Faizan, M., Tonny, S. H., Rajput, V. D., Minkina, T., Alatar, A. A., & Pathirana, R. (2023). Strigolactone-mediated mitigation of negative effects of salinity stress in *Solanum lycopersicum* through reducing the oxidative damage. *Sustainability*, 15(7), Artículo 5805. <https://doi.org/10.3390/su15075805>

- Guerrero, R., Herrera-Pucha, M., Rodriguez-Castro, R., & Villamar-Torres, R. O. (2025). Effect of *Bacillus* sp. and *Trichoderma* spp. on the development of banana seedlings (*Musa* spp. AAA) in the nursery stage. *Terra Latinoamericana*, 43, Artículo e2065. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2065>
- Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. *Bacteria*, 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>
- Heredia-Pinos, M. R., López-Bósquez, J. B., Rivera-Fernandez, R. D., Aransiola, S. A., & Maddela, N. R. (2025). Effect of phosphorus and calcium application via drench on the development of banana plantlets (*Musa paradisiaca*). *Sarhad Journal of Agriculture*, 41(4), 1910–1917. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2025/41.4.1910.1917>
- Hosseini, S. H., & Bostani, A. (2024). Quantitative and qualitative responses of quinoa to soil application of growth-promoting microorganisms under water stress. *Journal of Crop Health*, 76(3), 713–724. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-00970-4>
- Lestari, N. I., & Siswanti, D. U. (2024). Physiological and anatomical responses of red onion (*Allium cepa* L.) to drought stress after biofertilizer application. *Jurnal Biodjati*, 9(2), 359–372. <https://doi.org/10.15575/biodjati.v9i2.38613>
- Liu, B., Hu, Y., Li, M., Xue, H., Wang, Y., & Li, Z. (2024). Effects of drought stress on the functional traits and rhizosphere microbial community structure of *Cyperus esculentus*. *Grassland Science*, 70(3), 109–120. <https://doi.org/10.1111/grs.12422>
- Maquen-Perleche, J., Aldana-Carbonel, S., Suárez Muguerza, L., Sánchez-Purihuamán, M., Caro-Castro, J., & Carreño-Farfán, C. (2023). Biofertilizer based on fish waste increases the yield of *Vigna unguiculata* L. Walp, *Zea mays* L., and the rhizospheric microbiota. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 529–538. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.044>
- Mon, Y. Y., Bidabadi, S. S., Oo, K. S., & Zheng, S. J. (2021). The antagonistic mechanism of rhizosphere microbes and endophytes on the interaction between banana and *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 116, Artículo 101733. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101733>
- Pérez-Moncada, U. A., Santander, C., Ruiz, A., Vidal, C., Santos, C., & Cornejo, P. (2024). Design of microbial consortia based on arbuscular mycorrhizal fungi, yeasts, and bacteria to improve the biochemical, nutritional, and physiological status of strawberry plants growing under water deficits. *Plants*, 13(11), Artículo 1556. <https://doi.org/10.3390/plants13111556>
- Prisa, D. (2020). Optimised fertilisation with zeolites containing plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in *Ranunculus asiaticus*. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 10(1), 96–102. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2020.10.1.0011>
- Reyes-Nava, L. A., Pliego-Sandoval, J. E., Reyes-Bautista, R., & Iñiguez-Muñoz, L. E. (2025). Fijación de nitrógeno por valoración indirecta del ión amonio de bacterias aisladas de rizósfera y caulósfera de planta de maíz (*Zea mays* L.).

- Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 10(19), 2367–2374. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v10i19.19988>
- Rodríguez-Rodríguez, Y., Soldevilla-Hernández, L. I., Guevara, M. Á., Gandini, G., & Jáuregui-Haza, U. J. (2025). Assessment of a sargassum-based liquid biofertilizer for enhanced banana cultivation in small-scale family farms. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 12, Artículo 101252. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101252>
- Rodríguez-Zamora, M., Morán Centeno, J. C., Blandón-Díaz, J. U., & Martinuz, A. (2025). Control biológico de *Radopholus similis* (Cobb) Thorne mediante el uso de bacterias y hongos endófitos en *Musa paradisiaca* L. *La Calera*, 25(45), 144–151. <https://doi.org/10.5377/calera.v25i45.21924>
- Yetik, A. K., & Candoğan, B. N. (2023). Chlorophyll response to water stress and the potential of using crop water stress index in sugar beet farming. *Sugar Tech*, 25(1), 57–68. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01184-6>
- Zhang, H.-F., Pang, G.-B., Fu, Y.-R., Liu, H.-L., Su, X.-W., Zhang, L.-Z., Wang, X., & Xu, Z.-H. (2024). Effects of water stress at different growth stages on chlorophyll fluorescence parameters and yield of grape. *Water Saving Irrigation*, (7), 1–7. <https://doi.org/10.12396/jsqg.2023376>