

## Consorcios Bacterianos Rizosféricos como Bioestimulantes en el Cultivo de Orquídeas *Cattleya maxima* Rhizospheric Bacterial Consortia as Biostimulants in the Cultivation of *Cattleya maxima* Orchids

Fernando Abasolo-Pacheco<sup>1,2</sup> , Odalis Vilela-Sabando<sup>1</sup> , Gerald Saldarreaga-Chichande<sup>2</sup> ,  
Angel Virgilio Cedeño-Moreira<sup>2†</sup>  y Joselyne Vilela-Sabando<sup>2,3</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Biología y Microbiología; (F.A.P.), (G.S.C.), (A.C.M.), (O.V.S.). <sup>2</sup> Facultad de Ciencias Pecuarias; (F.A.P.), (G.S.C.), (A.C.M.), (O.V.S.). <sup>3</sup> Facultad de Ciencias de la Industria y Producción; (F.A.P.), (G.S.C.), (A.C.M.), (O.V.S.). Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

† Autor para correspondencia: acedenom@uteq.edu.ec

### RESUMEN

*Cattleya maxima* es una orquídea epífita endémica del Ecuador con alto valor ornamental y ecológico, cuya propagación se ve limitada por su crecimiento lento y baja eficiencia inicial en la adquisición de nutrientes durante las etapas tempranas de desarrollo, debido a la presencia de dormancia latente en las semillas que retrasa la germinación y el establecimiento de plántulas. El objetivo de este estudio fue caracterizar bacterias rizosféricas con potencial bioestimulante y evaluar su efecto sobre el establecimiento inicial de plántulas de *Cattleya maxima* durante la transición del cultivo de tejidos a condiciones de vivero. Se aislaron ocho cepas bacterianas a partir de suelo rizosférico asociado a orquídeas, los cuales fueron seleccionadas mediante caracterización morfológica, tinción de Gram y pruebas bioquímicas funcionales como la prueba de ureasa, amilasa y producción de ácido indolacético relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal. La actividad antagonista se evaluó mediante ensayos de cultivo dual frente a *Fusarium oxysporum*, mientras que la efectividad bioestimulante se determinó en un Diseño Completamente al Azar con tratamientos microbianos individuales, combinados y un control sin inoculación, cuantificando número de hojas, longitud radicular (cm), altura de planta (cm) y biomasa fresca (g). Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ), registrándose la mayor inhibición del crecimiento micelial con *Bacillus* spp. (66%), seguido de actinomicetos (57%) y *Pseudomonas* spp. (54%). La inoculación microbiana mejoró el desempeño morfofuncional de las plántulas respecto al control, destacando el tratamiento combinado por maximizar el número de hojas ( $6.22 \pm 0.40$ ), la longitud de raíces ( $4.05 \pm 0.39$  cm) y la altura de planta ( $5.42 \pm 0.43$  cm), mientras que la mayor biomasa fresca se obtuvo con actinomicetos ( $10.56 \pm 0.73$  g). Los hallazgos demuestran que la selección funcional de bacterias rizosféricas mejora significativamente el establecimiento inicial de *C. maxima*.

**Palabras clave:** bacterias, estimulación, propagación, protección vegetal.

### SUMMARY

*Cattleya maxima* is an epiphytic orchid endemic to Ecuador with high ornamental and ecological value, whose propagation is limited by slow growth and low initial efficiency in nutrient uptake during early developmental stages, due to the presence of seed dormancy that delays germination and seedling establishment. The objective of this study was to characterize rhizospheric bacteria with potential bio-stimulatory activity and evaluate their effect on the initial establishment of *Cattleya maxima* seedlings during the transition from tissue culture to nursery conditions. Eight



#### Cita recomendada:

Abasolo-Pacheco, F., Vilela-Sabando, O., Saldarreaga-Chichande, G., Cedeño-Moreira, A. V., & Vilela-Sabando, J. (2026). Consorcios Bacterianos Rizosféricos como Bioestimulantes en el Cultivo de Orquídeas *Cattleya maxima*. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-10. e2556. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2556>

Recibido: 18 de febrero de 2026.

Aceptado: 24 de marzo de 2026.

Artículo. Volumen 44.

Junio de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Abasolo Pacheco



**Copyright:** © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

bacterial strains were isolated from orchid-associated rhizospheric soil and selected based on morphological characterization, Gram staining, and functional biochemical assays, including urease, amylase, and indole-3-acetic acid production related to plant growth promotion. Antagonistic activity was assessed using dual culture assays against *Fusarium oxysporum*, while bio-stimulatory effectiveness was evaluated in a Completely Randomized Design with individual, combined, and uninoculated control treatments, quantifying leaf number, root length (cm), plant height (cm), and fresh biomass (g). The results showed significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ), with the highest fungal growth inhibition recorded for *Bacillus* spp. (66%), followed by actinomycetes (57%) and *Pseudomonas* spp. (54%). Microbial inoculation improved seedling morpho-functional performance compared to the control, with the combined treatment maximizing leaf number ( $6.22 \pm 0.40$ ), root length ( $4.05 \pm 0.39$  cm), and plant height ( $5.42 \pm 0.43$  cm), while the highest fresh biomass was obtained with actinomycetes ( $10.56 \pm 0.73$  g). These findings demonstrate that functional selection of rhizospheric bacteria significantly enhances the initial establishment of *C. maxima*.

**Index words:** bacteria, stimulation, propagation, plant protection.

## INTRODUCCIÓN

Las orquídeas constituyen uno de los grupos de plantas ornamentales más diversos y ecológicamente especializados, caracterizadas por una marcada dependencia de interacciones rizosféricas para su establecimiento y desarrollo (Xian *et al.*, 2025). *Cattleya maxima*, una orquídea epífita endémica del Ecuador, posee un alto valor ornamental y ecológico; sin embargo, su propagación y cultivo sostenible presentan limitaciones asociadas a su crecimiento lento, elevada sensibilidad a las condiciones del sustrato y baja eficiencia en la adquisición de nutrientes durante las etapas iniciales de desarrollo (López-Escamilla, Badillo, Rodríguez, García y Sánchez, 2024). En las últimas décadas, los sistemas de producción vegetal han experimentado una transición hacia prácticas más sostenibles, impulsando la reducción del uso de fertilizantes que incluyen compuestos nitrogenados, fosfatados y potásicos y reguladores de crecimiento de origen sintético, como las auxinas y giberelinas (Zimmermann *et al.*, 2021).

Los bioestimulantes han adquirido importancia como herramientas capaces de mejorar el crecimiento y la calidad de las plantas mediante la activación de procesos fisiológicos y metabólicos específicos, sin actuar directamente como fuentes de nutrientes o agentes fitosanitarios (Hamid *et al.*, 2021). Dentro de los bioestimulantes de origen microbiano, entre los géneros bacterianos con mayor potencial bioestimulante se encuentran *Bacillus*, *Pseudomonas* y los actinomicetos (Das *et al.*, 2021). Las bacterias rizosféricas promotoras del crecimiento vegetal son uno de los grupos más estudiados debido a su capacidad para modular el desarrollo radicular, como por ejemplo la quimiotaxis, que permite que la planta emita ciertos exudados por las raíces después de su proceso metabólico, optimizar la disponibilidad de nutrientes y mejorar la tolerancia de las plantas frente a condiciones de estrés por salinidad, cambios en la temperatura y presencia de patógenos (Kumari, Swarupa, Kesari y Kumar, 2022). Estas bacterias ejercen sus efectos mediante mecanismos como la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes minerales, la fijación biológica de nitrógeno y la síntesis de metabolitos secundarios bioactivos como estreptomycin y lipopeptidos (Vaghela y Gohel, 2022).

Las especies de *Bacillus* spp. y los actinomicetos son bacterias Gram positivas con alta adaptabilidad a distintas condiciones ambientales. *Bacillus* spp. se distingue por su capacidad de formar endosporas que le permiten sobrevivir a variaciones de temperatura y por producir compuestos funcionales que favorecen el crecimiento vegetal y la estabilidad de la rizósfera (Nandana y Anith, 2025). Por su parte, los actinomicetos son formadores de micelio y se reconocen por su habilidad para sintetizar diversos metabolitos secundarios con potencial funcional en la rizósfera (Salwan, Sharma, Saini y Pandey, 2021). Diversas investigaciones han demostrado que cepas del género *Streptomyces*, así como de *Micromonospora* y *Nocardia*, pueden colonizar la rizosfera e incluso establecer asociaciones endofíticas en cultivos de importancia agrícola, induciendo mejoras significativas en la germinación, el crecimiento radicular (Vandana *et al.*, 2021).

Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar bacterias rizosféricas con potencial bioestimulante sobre el crecimiento vegetal de *C. maxima*, en condiciones controladas. El estudio se plantea como una estrategia para promover la producción y conservación sostenible de orquídeas endémicas mediante el uso de bacterias benéficas.

---

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización

La investigación se desarrolló en los laboratorios de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicados en el Campus Universitario "La María", cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador (01° 04' 51" S; 79° 30' 08" O).

### Diseño Experimental

Se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) para evaluar el efecto bioestimulante de bacterias rizosféricas asociadas a orquídeas sobre el crecimiento inicial de plántulas. Se establecieron cuatro tratamientos: (T1) consorcio bacteriano compuesto por *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp.; (T2) actinomicetos; (T3) tratamiento combinado (*Bacillus* spp. + *Pseudomonas* spp. + actinomicetos); y (T4) tratamiento control sin inoculación bacteriana. Cada tratamiento contó con 3 repeticiones y 3 unidades experimentales por repetición.

### Manejo del Experimento

#### Toma de Muestras y Aislamiento de Bacterias Rizosféricas

Las muestras de suelo rizosférico fueron recolectadas en zonas directamente asociadas a orquídeas, considerando al menos cinco submuestras por sitio, las cuales fueron homogenizadas para conformar una muestra compuesta representativa. El material fue transportado al laboratorio en condiciones asépticas. Con el fin de favorecer la recuperación de bacterias esporuladas y reducir la carga microbiana no deseada, las muestras fueron sometidas a un pretratamiento térmico en baño maría a 60 °C. Posteriormente, se pesó 1 g de suelo y se suspendió en 90 ml de agua peptonada estéril. Se realizaron diluciones seriadas, y la dilución 10<sup>-5</sup> fue sembrada por el método de dispersión superficial en medio de cultivo sólido. Las placas se incubaron a temperatura de 35° hasta la aparición de colonias bacterianas, las cuales fueron seleccionadas y purificadas mediante resiembras sucesivas (Ferreira, Helmersen, Visnovska, Jørgensen y Aamot, 2021).

### Caracterización Morfológica

La caracterización morfológica de los aislamientos bacterianos se llevó a cabo mediante la observación macroscópica de las colonias desarrolladas en medio de cultivo, considerando parámetros como la forma, coloración, tipo de borde, elevación y textura superficial (Canchignia Martínez *et al.*, 2024; García-Bernal *et al.*, 2025). Adicionalmente, se evaluó la uniformidad del crecimiento y el aspecto general de las colonias, lo que permitió establecer patrones morfológicos consistentes. Estas características facilitaron una diferenciación preliminar entre los grupos bacterianos evaluados, así como la identificación de variabilidad intraespecífica, permitiendo la selección de cepas representativas con características contrastantes para su posterior evaluación funcional y aplicación en los ensayos experimentales. (Tarigan, Barus, Munar y Lestami, 2023).

### Caracterización Bioquímica y Funcional

La caracterización de las cepas bacterianas se realizó mediante pruebas químicas y bioquímicas orientadas a su identificación estructural y funcional. Se aplicó la tinción de Gram para diferenciar el tipo de pared celular y la prueba de catalasa para evaluar la actividad metabólica primaria, considerándose positiva la formación de burbujas tras la adición de peróxido de hidrógeno (Shah, Khan, Aziz, Ali y Pecoraro, 2021).

El potencial bioestimulante se evaluó mediante ensayos de actividad ureasa, utilizando solución de urea al 2 % como sustrato; actividad amilasa, con almidón soluble al 1 %; solubilización de fosfatos inorgánicos, empleando fosfato tricálcico en medio sólido Pikovskaya; y producción de ácido indolacético, mediante medio LB suplementado con triptófano al 0.5 g L<sup>-1</sup>. Las reacciones positivas se identificaron por formación de halos de hidrólisis o zonas de solubilización, mientras que la ausencia de estas respuestas se interpretó como reacción negativa (Proadhan *et al.*, 2023).

## Conservación de las Cepas Bacterianas

Las cepas purificadas fueron conservadas en medio líquido suplementado con glicerol estéril, manteniéndose a bajas temperaturas para preservar su viabilidad metabólica y estabilidad genética durante el periodo experimental (Anjana, Rawat y Goswami, 2023).

## Prueba de antagonismo *in vitro* Frente a *Fusarium oxysporum*

Se implementó un ensayo de confrontación directa (cultivo dual) frente a *Fusarium oxysporum*. En placas con PDA se inoculó cada bacteria en un extremo y, en el extremo opuesto, un disco de micelio activo del patógeno. Las unidades experimentales se incubaron a temperatura controlada hasta que el control evidenció el crecimiento característico. La actividad antagonista se determinó midiendo el crecimiento radial del hongo y calculando el porcentaje de inhibición respecto al control (Liu *et al.*, 2024).

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{R_c - R_t}{R_c} \times 100 \quad (1)$$

Donde:  $R_c$  = crecimiento radial del hongo en el control (mm);  $R_t$  = crecimiento radial del hongo en presencia de la bacteria (mm).

## Aplicación de Tratamientos Bacterianos en Plántulas

Finalizada la fase de aclimatación de las orquídeas obtenidas del cultivo de tejido, las plántulas fueron inoculadas de acuerdo con los tratamientos establecidos. Para la preparación del inóculo bacteriano, las cepas seleccionadas fueron reactivadas en el medio Nutrient Broth e incubadas bajo condiciones controladas durante 24 a 48 horas hasta alcanzar la fase exponencial de crecimiento. La densidad celular en la fase exponencial se determinó mediante conteo de colonias, ajustando la suspensión por dilución o concentración hasta alcanzar  $10^8$  UFC mL. La aplicación de los microorganismos se realizó directamente en la zona radicular de cada plántula, asegurando una distribución homogénea del inóculo (Sun, Liu, Shi, Peng y Xiao, 2022).

## Variables Evaluadas

Se evaluaron variables morfológicas asociadas al crecimiento vegetal, incluyendo longitud de raíz (cm), Altura de planta (cm), número de hojas y biomasa fresca (g). Estas variables permitieron determinar el efecto de los tratamientos bacterianos sobre el desarrollo inicial de las plántulas.

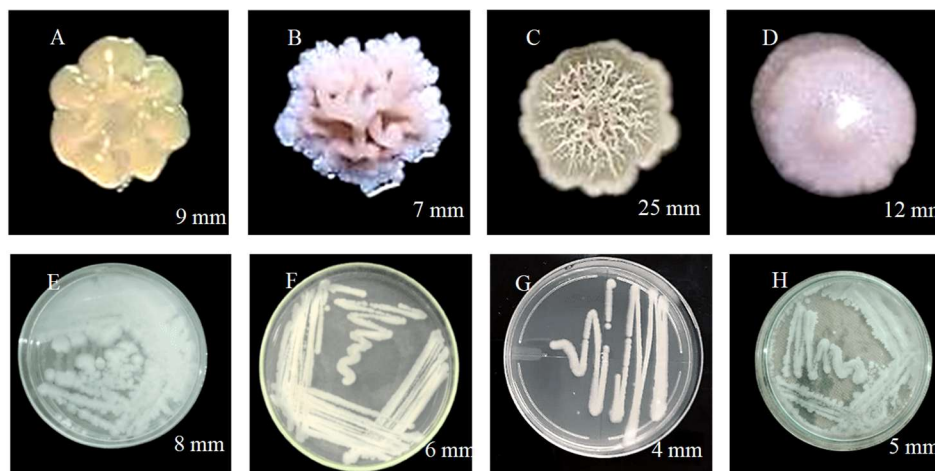
## Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos, se aplicaron pruebas de comparación múltiple con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$ . El procesamiento estadístico de los datos se realizó utilizando el software R versión 4.3.1 (R Core Team, 2023).

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## Aislamiento y Caracterización Morfológica de Bacterias Rizosféricas con Potencial Bioestimulante

Se aislaron y purificaron ocho cepas bacterianas a partir de muestras rizosféricas asociadas a orquídeas, correspondientes a cuatro actinomicetos (Act 1, Act 2, Act 3 y Act 4), dos cepas del género *Bacillus* (Bc 1 y Bc 2) y dos cepas del género *Pseudomonas* (Ps 1 y Ps 2). Las colonias mostraron variabilidad morfológica en cuanto a forma, elevación y borde, con predominio de colonias circulares, elevación plana o convexa y bordes enteros e irregulares. En los actinomicetos se observaron características típicas del grupo, como crecimiento lento, consistencia pulverulenta, además de pigmentaciones que variaron entre tonos claros y oscuros (Figura 1).



**Figura 1. Características morfológicas de colonias de bacterias rizosféricas aisladas de orquídeas. (A-D) Actinomicetos; (E-F) *Bacillus* spp.; (G-H) *Pseudomonas* spp.**  
**Figure 1. Morphological characteristics of rhizospheric bacterial colonies isolated from orchids. (A-D) Actinomycetes; (E-F) *Bacillus* spp.; (G-H) *Pseudomonas* spp.**

### Perfil Funcional de Bacterias Rizosféricas

El perfil funcional reveló diferencias en las actividades metabólicas entre los grupos bacterianos evaluados. Las cuatro cepas de actinomicetos mostraron reacción positiva a la prueba de catalasa y presentaron variación para la hidrólisis de urea y almidón, así como para la solubilización de fosfatos inorgánicos. Asimismo, se evidenció la producción de ácido indolacético (AIA), con respuestas diferenciales entre cepas. Las cepas de *Bacillus* presentaron alta actividad catalasa y amilolítica, además de una marcada capacidad para la solubilización de fosfatos y producción de AIA. Por su parte, las cepas de *Pseudomonas* mostraron reacción positiva a la prueba de catalasa, capacidad para la solubilización de fosfatos y producción de AIA, con variabilidad entre cepas (Cuadro 1).

La diversidad morfológica observada entre los aislamientos es coherente con la heterogeneidad funcional esperada en comunidades rizosféricas asociadas a *C. maxima*. En actinomicetos, el crecimiento lento y la textura seca o pulverulenta sugieren un fenotipo típico de actinomicetos con capacidad de persistencia y producción de compuestos bioactivos, rasgo compatible con actividades promotoras del crecimiento y antagonistas reportadas bajo condiciones controladas (Elshafie y Camele, 2022). En contraste, la morfología húmeda y el crecimiento rápido en *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. con propiedades típicas de bacterias promotoras del crecimiento vegetal y capacidad para favorecer la colonización temprana y el establecimiento efectivo en la rizósfera (Herrera, Fuentes, Soto, Valadares y Arriagada, 2022).

El perfil bioquímico funcional demostró compatibilidad con mecanismos de bioestimulación, que demuestran características asociadas a nutrición mineral y señalización hormonal. Santoyo *et al.* (2021) señalan que la eficacia de consorcios microbianos depende de la complementariedad entre sus integrantes (Rawat, Das, Shankhdhar y Shankhdhar, 2020). Asimismo, la síntesis bacteriana de fitohormonas puede influir en la estructura radicular y en las respuestas fisiológicas asociadas al establecimiento de la planta; Timofeeva, Galyamova y Sedykh (2024) describen este rol como un eje de regulación de crecimiento y ajuste a condiciones subóptimas. En concordancia, el desempeño funcional observado en *Bacillus* es consistente con su carácter multimecanístico como bioestimulante (Etesami, Jeong y Glick, 2023), mientras que actinomicetos asociados a orquídeas se han relacionado con funciones de crecimiento y supresión de fitopatógenos (Saikia, Mazumdar y Thakur, 2022).

### Actividad Antagonista *in vitro* de Bacterias Frente a *Fusarium oxysporum*

Se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ) en la inhibición del crecimiento micelial de *Fusarium oxysporum* (Figura 2). Todos los antagonistas redujeron el avance radial del patógeno respecto al control, observándose una restricción del frente de crecimiento hacia la colonia bacteriana, *Bacillus* spp. presentó mayor actividad antagonista con 66% de inhibición, seguido de actinomicetos (57%) y *Pseudomonas* spp. (54%).

**Cuadro 1. Caracterización morfológica y perfil bioquímico funcional de bacterias rizosféricas aisladas.**  
**Table 1. Morphological characterization and functional biochemical profile of isolated rhizospheric bacteria.**

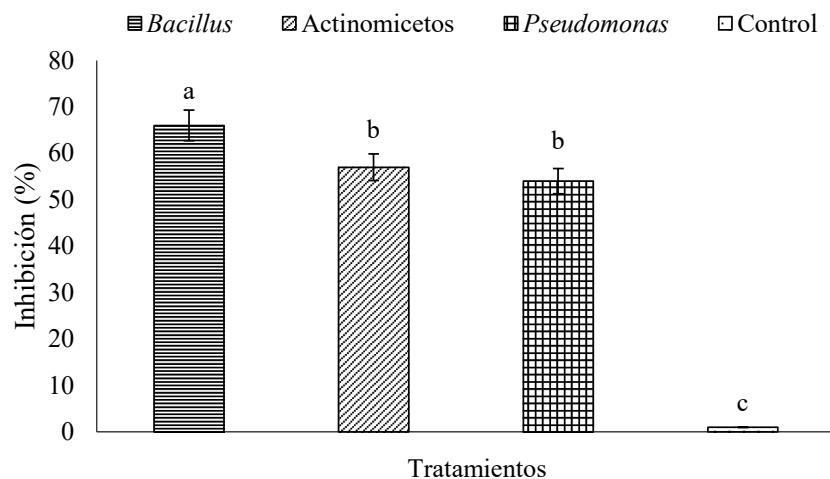
Código	N°	Forma	Elevación	Borde	TG	CAT	UR	AM	SF	AIA
Act 1	A	Irregular	Umbilicada	Ondulado	+	++	+	+	++	+
Act 2	B	Irregular	Umbilicada	Ondulado	+	+	-	+	++	++
Act 3	C	Filamentosa	Elevada	Filamentoso	+	+	-	+	+	+
Act 4	D	Circular	Convexa	Entero	+	+	+	++	+	+
Bc 1	E	Irregular	Elevada	Ondulado	+	++	+	+	++	++
Bc 2	F	Irregular	Plana	Ondulado	+	+	-	++	+	+
Ps 1	G	Circular	Plana	Entero	-	++	-	+	+	+
Ps2	H	Irregular	Elevada	Filamentoso	-	++	-	+	+	+

TG = tinción de Gram; CAT = catalasa; UR = ureasa; AM = amilasa; SF = solubilización de fosfato; los símbolos indican la respuesta de los aislamientos bacterianos a las pruebas realizadas; (-) = reacción negativa; (+) = reacción positiva; (++) = reacción fuertemente positiva.

TG = Gram staining; CAT = catalase; UR = urease; AM = amylase; SF = phosphate solubilization; symbols indicate the response of bacterial isolates to the assays performed; (-) = negative reaction; (+) = positive reaction; (++) = strongly positive reaction.

La confrontación mostró un efecto antagonista diferencial frente a *Fusarium oxysporum*, siendo *Bacillus* spp. la cepa más efectiva (66%), seguida de actinomicetos (57%) y *Pseudomonas* spp. (54%). Esta variación se relaciona con la capacidad de cada cepa para producir compuestos bioactivos, como antibióticos, enzimas líticas y metabolitos secundarios, que limitan la expansión del hongo y generan una zona de interacción restringiendo su crecimiento hacia la colonia bacteriana. Estos resultados concuerdan con Boulahouat *et al.* (2023), quienes describen que la eficacia de rizobacterias en biocontrol depende de mecanismos combinados de antibiosis y competencia por recursos, y con Djebaili *et al.* (2021), quienes destacan la capacidad de *Bacillus* spp. para producir metabolitos antifúngicos y mantener alta adaptabilidad en condiciones variables.

La inhibición registrada por actinomicetos concuerda con su potencial para sintetizar metabolitos secundarios con actividad antifúngica y, simultáneamente, expresar rasgos promotores del crecimiento, lo que sustenta su valor como candidatos de doble función (Pimpalse y Naga Rathna Supriya, 2025). La magnitud intermedia observada también se alinea con la variabilidad intra grupo reportada para actinomicetos asociados a plantas, donde la eficacia depende del aislado y del patógeno evaluado (Ebrahimi-Zarandi, Riseh y Tarkka, 2022). En *Pseudomonas*, la supresión obtenida, aunque menor, mantiene relevancia por su contribución frecuente a la bioprotección del sistema radical (Hamid *et al.*, 2021).



**Figura 2. Porcentaje de inhibición in vitro de *Fusarium oxysporum* por bacterias rizosféricas.** Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ).

**Figure 2. In vitro inhibition percentage of *Fusarium oxysporum* by rhizospheric bacteria.** Different letters indicate significant statistical differences ( $p < 0.05$ ).

### Emisión Foliar en *Cattleya maxima* tras la Inoculación Microbiana

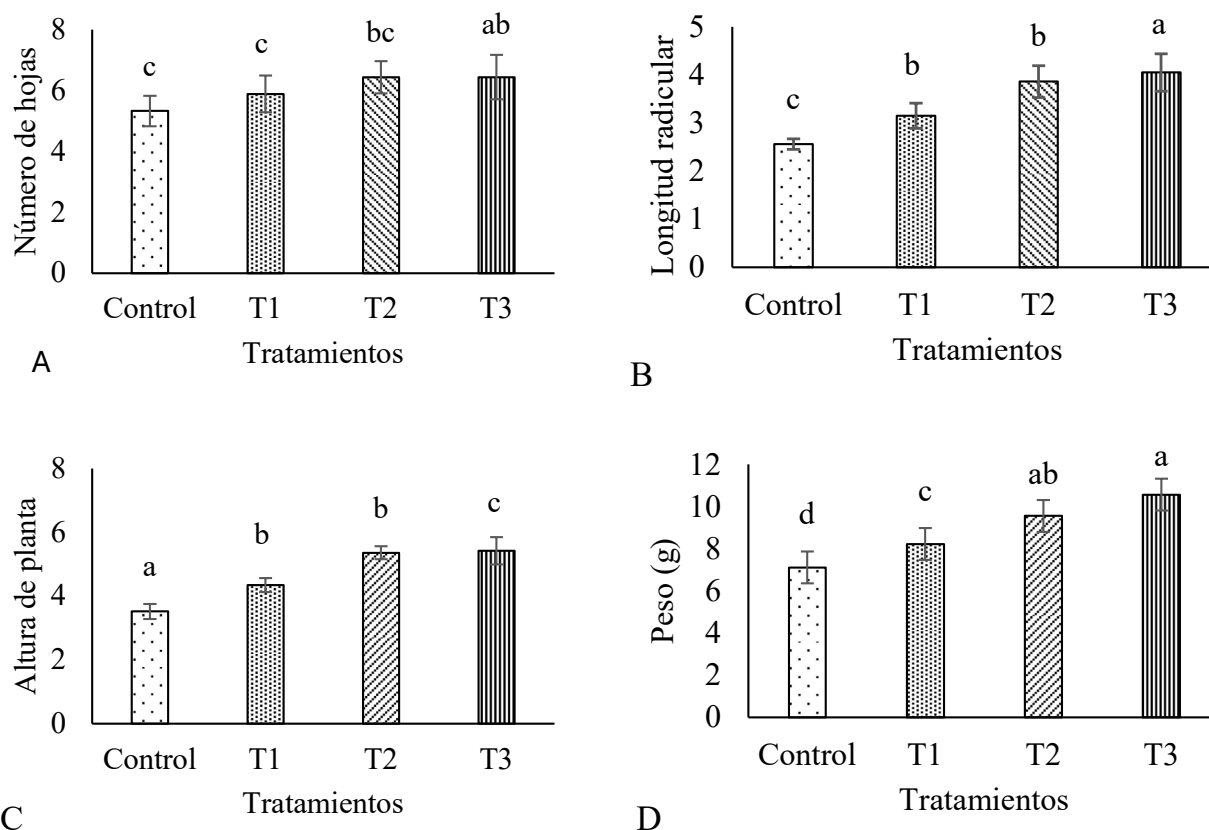
El número de hojas varió entre tratamientos ( $p < 0.05$ ) (Figura 3). El consorcio combinado registró el mayor promedio ( $6.22 \pm 0.4$ ) y se ubicó en el grupo estadístico superior. *Bacillus* y *Pseudomonas* ( $5.89 \pm 0.6$ ) y actinomicetos ( $5.67 \pm 0.5$ ) superaron al control ( $5.33 \pm 0.5$ ). El incremento relativo fue 17% para el consorcio combinado, 11% para *Bacillus* y 6% para actinomicetos, respecto al control.

### Respuesta Radicular Inducida por Consorcios Rizosféricos

La longitud de raíces mostró diferencias significativas entre tratamientos, valores máximos en el consorcio combinado ( $4.05 \pm 0.39$  cm) y actinomicetos ( $3.86 \pm 0.33$  cm), ambos por encima del control ( $2.56 \pm 0.11$  cm). *Bacillus* y *Pseudomonas* ( $3.15 \pm 0.26$  cm) se ubicaron en un grupo intermedio. Los incrementos relativos fueron 58% y 51% para consorcio combinado y actinomicetos, y 23% para *Bacillus* y *Pseudomonas*.

### Altura de Planta Bajo Tratamientos Microbianos

El consorcio combinado ( $5.42 \pm 0.43$  cm) y actinomicetos ( $5.36 \pm 0.20$  cm) presentaron los mayores valores de altura y se separaron del control ( $3.52 \pm 0.24$  cm), *Bacillus* ( $4.35 \pm 0.22$  cm) mostraron respuesta intermedia. La variación observada respondió al tratamiento, según ANOVA ( $p < 0.05$ ).



**Figura 3. Respuesta de crecimiento de *Cattleya maxima* a la inoculación con consorcios microbianos rizosféricos.** A) Número de hojas, B) Longitud radicular, C) Altura de planta, D) Biomasa fresca. Las barras representan la media y la línea sobre la barra indica la desviación estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre los promedios a ( $p < 0.05$ ).

**Figure 3. Growth response of *Cattleya maxima* to inoculation with rhizospheric microbial consortia.** A) Number of leaves, B) Root length, C) Plant height, D) Fresh biomass. The bars represent the mean values, and the error bars indicate the standard deviation. Different letters indicate significant differences between means at ( $p < 0.05$ ).

## Acumulación de Biomasa Fresca

La biomasa fresca presentó diferencias entre tratamientos ( $p < 0.05$ ) (Figura 4). El tratamiento combinado T3 registró el mayor peso ( $10.56 \pm 0.73$  g), conformando el grupo estadístico superior, seguido de T2 actinomicetos ( $9.56 \pm 0.73$  g), mientras que el control mostró el menor valor ( $7.11 \pm 0.60$  g).

En términos ecofisiológicos, el incremento simultáneo de emisión foliar y elongación radicular bajo el tratamiento combinado es consistente con un escenario de coexpresión de mecanismos promotores del crecimiento, donde la disponibilidad de fósforo, la señalización hormonal y la mejora del microambiente rizosférico actúan de forma integrada, aumentando la eficiencia de establecimiento en etapas tempranas (Santoyo *et al.*, 2021). La mayor longitud radicular observada respalda una modulación de raíces asociada a fitohormonas microbianas, particularmente auxinas, que regulan elongación y ramificación y, con ello, la capacidad de exploración del sustrato y absorción hídrico-nutricional (Timofeeva *et al.*, 2024). A su vez, la solubilización de fosfatos detectada en el perfil funcional constituye un mecanismo mecanístico coherente con la mejora del crecimiento, dado que la movilización de P poco disponible incrementa su aprovechamiento por la planta en fases de alta demanda fisiológica (Rawat *et al.*, 2020).

*Bacillus* y *Pseudomonas* mostraron un desempeño consistente dentro de los tratamientos efectivos. Esto coincide con la literatura, que los describe como bioestimulantes multimecanístico con alta adaptabilidad y capacidad para activar múltiples rutas metabólicas. (Lara-Capistrán *et al.*, 2020; Etesami *et al.*, 2023). La mayor biomasa fresca asociada a actinomicetos refuerza su potencial como grupo con alta capacidad biosintética, incluyendo metabolitos secundarios y compuestos reguladores que pueden intensificar la asimilación y el crecimiento en condiciones controladas, además de aportar funciones de soporte sanitario del sistema radical (Javed, Tripathi, Mishra y Dashora, 2020). El patrón observado indica que la respuesta en *C. maxima* no depende únicamente de un rasgo aislado, sino de la integración de funciones rizosféricas que favorecen nutrición y señalización en el periodo crítico de establecimiento.



**Figura 4. Efecto de consorcios microbianos rizosféricos sobre el crecimiento de plántulas de *Cattleya maxima*.** Se muestran las plantas correspondientes a cada tratamiento: Control, T1 con *Bacillus* y *Pseudomonas*, T2 con Actinobacterias y T3 con el consorcio combinado.

**Figure 4. Effect of rhizospheric microbial consortia on the growth of *Cattleya maxima* plantlets.** The plants corresponding to each treatment are shown: Control, T1 with *Bacillus* and *Pseudomonas*, T2 with Actinobacteria, and T3 with the combined consortium.

## CONCLUSIONES

Las cepas bacterianas aisladas de la rizósfera de *Cattleya maxima* presentan perfiles morfológicos y bioquímicos compatibles con mecanismos de bioestimulación, incluyendo producción de fitohormonas y solubilización de nutrientes.

Los ensayos *in vitro* mostraron actividad antagonista frente a *Fusarium oxysporum*, con mayor supresión por *Bacillus* spp., seguida de actinomicetos y *Pseudomonas* spp., en comparación con el control. Estos resultados confirman la utilidad de la selección funcional de bacterias para priorizar cepas con potencial bioestimulante y biocontrolador.

Bajo condiciones de vivero, la inoculación microbiana indujo mejoras cuantificables en variables morfofuncionales clave de *C. maxima*, particularmente en emisión foliar, elongación radicular, altura de planta y acumulación de biomasa, con un desempeño superior en el consorcio combinado. Esto indica efectos complementarios entre microorganismos sobre el establecimiento temprano de plántulas y refuerza su aplicabilidad en sistemas de producción con menor dependencia de insumos sintéticos.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

Este trabajo fue financiado y apoyado por el proyecto FOCICYT titulado "Potencial de actinomicetos en cultivos de interés agrícola en Ecuador: Biocontrol, biorremediación y promotores de crecimiento", cuya contribución fue clave para el desarrollo experimental, la adquisición de insumos y la sistematización de resultados.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: F.A.P. y A.C.M.; Metodología: O.V.S., G.S.C. y J.V.S.; Validación: F.A.P. y A.C.M.; Análisis formal: O.V.S. y G.S.C.; Curación de datos: O.V.S. y G.S.C.; Escritura - preparación del borrador original: O.V.S.; Escritura - revisión y edición: F.A.P., O.V.S., G.S.C., A.C.M. y J.V.S.; Administración del proyecto: F.A.P. y A.C.M.; Adquisición de fondos: F.A.P. y A.C.M.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), así como al Ing. Erick García, técnico de laboratorio, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

## LITERATURA CITADA

- Anjana, N., Rawat, S., & Goswami, S. (2024). Synergistic approach for enhanced production of polyhydroxybutyrate by *Bacillus pseudomycoides* SAS-B1: Effective utilization of glycerol and acrylic acid through fed-batch fermentation and its environmental impact assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 258, 128764. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128764>
- Boulahouat, S., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., Alenezi, F. N., & Belbahri, L. (2023). Biocontrol efficiency of rhizospheric *Bacillus* against the plant pathogen *Fusarium oxysporum*: A promising approach for sustainable agriculture. *Microbiology Research*, 14(3), 892-908. <https://doi.org/10.3390/microbiolres14030062>
- Canchignia-Martínez, H. F., Vera-Benites, L. F., Tapia-Quintana, D. N., Cedeño-Moreira, Á. V., García-Intriago, E., & Macías-Holguín, C. J. (2024). Caracterización bioquímica de rizobacterias endófitas con actividad biocontroladora contra *Phytophthora palmivora* y *Lasiodiplodia theobromae*. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1807>

- Das, P., Singh, S. K., Singh, P., Zeyad, M. T., Aamir, M., & Upadhyay, R. S. (2021). Actinomycetes as biostimulants and their application in agricultural practices. In J. F. White, A. Kumar, & S. Drobny (Eds.), *Microbiome stimulants for crops: Mechanisms and applications* (pp. 267-282). Duxford, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00021-2>
- Djebaili, R., Pellegrini, M., Ercole, C., Farda, B., Kitouni, M., & Del Gallo, M. (2021). Biocontrol of soil-borne pathogens of *Solanum lycopersicum* L. and *Daucus carota* L. by plant growth-promoting actinomycetes: *In vitro* and in planta antagonistic activity. *Pathogens*, *10*(10), 1305. <https://doi.org/10.3390/pathogens10101305>
- Ebrahimi-Zarandi, M., Riseh, R. S., & Tarkka, M. T. (2022). Actinobacteria as effective biocontrol agents against plant pathogens: An overview on their role in eliciting plant defense. *Microorganisms*, *10*(9), 1739. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091739>
- Elshafie, H. S., & Camele, I. (2022). Rhizospheric actinomycetes revealed antifungal and plant-growth-promoting activities under controlled environment. *Plants*, *11*(14), 1872. <https://doi.org/10.3390/plants11141872>
- Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2023). Potential use of *Bacillus* spp. as an effective biostimulant against abiotic stresses in crops—A review. *Current Research in Biotechnology*, *5*, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100128>
- Ferreira, F. A., Helmersen, K., Visnovska, T., Jørgensen, S. B., & Aamot, H. V. (2021). Rapid nanopore-based DNA sequencing protocol of antibiotic-resistant bacteria for use in surveillance and outbreak investigation. *Microbial Genomics*, *7*(4), 1-12. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000557>
- García-Bernal, M., Medina-Marrero, R., Hernández, L. C., Hernández, U. Á., Ojeda-Silvera, C. M., Batista-Sánchez, D., & Mazón-Suástegui, J. M. (2025). Actinomicetos promueven crecimiento en plántulas de *Nicotiana tabacum* L. *Terra Latinoamericana*, *43*, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.1981>
- Hamid, B., Zaman, M., Farooq, S., Fatima, S., Sayyed, R. Z., Baba, Z. A., ... & Suriani, N. L. (2021). Bacterial plant biostimulants: a sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops. *Sustainability*, *13*(5), 2856. <https://doi.org/10.3390/su13052856>
- Herrera, H., Fuentes, A., Soto, J., Valadares, R., & Arriagada, C. (2021). Orchid-associated bacteria and their plant growth promotion capabilities. In J. M. Mérillon & H. Kodja (Eds.). *Orchids phytochemistry, biology and horticulture* (pp. 1-26). Cham, Switzerland: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38392-3\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38392-3_35)
- Javed, Z., Tripathi, G. D., Mishra, M., & Dashora, K. (2020). Actinomycetes - The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *31*, 101893. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893>
- Kumari, M., Swarupa, P., Kesari, K. K., & Kumar, A. (2022). Microbial inoculants as plant biostimulants: A review on risk status. *Life*, *13*(1), 12. <https://doi.org/10.3390/life13010012>
- Lara-Capistrán, L., Zulueta-Rodríguez, R., Murillo-Amador, B., Romero-Bastidas, M., Rivas-García, T., & Hernández-Montiel, L. G. (2020). Agronomic response of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) to application of *Bacillus subtilis* and vermicompost in greenhouse. *Terra Latinoamericana*, *38*(3), 693-704. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.737>
- Liu, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Kou, Z., Wang, X., Wang, Y., ... & Tian, Y. (2024). Biocontrol effects of three antagonistic bacteria strains against *Codonopsis pilosula* wilt disease caused by *Fusarium oxysporum*. *Biological Control*, *190*, 105446. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105446>
- López-Escamilla, A. L., Badillo-Huerta, V., Rodríguez-Cuamatzi, P., García-Dávila, J., & Sánchez-Minutti, L. (2024). Bioactive compounds in *Laelia speciosa* (Orchidaceae) seedlings grown in temporary immersion bioreactor. *Mexican Journal of Biotechnology*, *9*(1), 19-32. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2024.9.1.19>
- Nandana, M. S., & Anith, K. N. (2025). Endospore-producing endophytes: Structural adaptations, functional roles, and their significance in plant growth and stress management. *International Journal of Plant & Soil Science*, *37*(8), 298-312. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i85631>
- Pimpale, M., & Naga Rathna Supriya, G. (2025). A multifaceted approach of *Rhizobium* sp. PS1 for biodegradation of azo dye blue GSL and plant growth promotion by alleviating dye induced stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *41*(7), 210. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04443-2>
- Prodhan, M. Y., Rahman, M. B., Rahman, A., Akbor, M. A., Ghosh, S., Nahar, M. N. E. N., ... & Haque, M. A. (2023). Characterization of growth-promoting activities of Consortia of Chloropyrifos mineralizing endophytic bacteria naturally harboring in rice plants—a potential biostimulant to develop a safe and sustainable agriculture. *Microorganisms*, *11*(7), 1821. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071821>
- R Core Team (2023). *R: A language and environment for statistical computing User's Guide* (Version 4.3.1). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2020). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(1), 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- Saikia, J., Mazumdar, R., & Thakur, D. (2022). Phylogenetic affiliation of endophytic actinobacteria associated with selected orchid species and their role in growth promotion and suppression of phytopathogens. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1058867. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1058867>
- Salwan, R., Sharma, V., Saini, R., & Pandey, M. (2021). Identification of plant beneficial *Bacillus* spp. for resilient agricultural ecosystem. *Current Research in Microbial Sciences*, *2*, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100046>
- Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., Santos-Villalobos, S. D. L., Orozco-Mosqueda, M. D. C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy*, *11*(2), 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>
- Shah, D., Khan, M. S., Aziz, S., Ali, H., & Pecoraro, L. (2021). Molecular and biochemical characterization, antimicrobial activity, stress tolerance, and plant growth-promoting effect of endophytic bacteria isolated from wheat varieties. *Microorganisms*, *10*(1), 21. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010021>
- Sun, M., Liu, X., Shi, K., Peng, F., & Xiao, Y. (2022). Effects of root zone aeration on soil microbes species in a peach tree rhizosphere and root growth. *Microorganisms*, *10*(10), 1879. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10101879>
- Tarigan, D., Barus, W., Munar, A., & Lestami, A. (2023). Exploration and morphological characterization of phosphate-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria in saline soil. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, *52*(2), 550-563. <https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.2.27>
- Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2024). How do plant growth-promoting bacteria use plant hormones to regulate stress reactions? *Plants*, *13*(17), 2371. <https://doi.org/10.3390/plants13172371>
- Vaghela, N., & Gohel, S. (2022). Medicinal plant-associated rhizobacteria enhance the production of pharmaceutically important bioactive compounds under abiotic stress conditions. *Journal of Basic Microbiology*, *63*(3-4), 308-325. <https://doi.org/10.1002/jobm.202200361>
- Vandana, U. K., Rajkumari, J., Singha, L. P., Satish, L., Alavilli, H., Sudheer, P. D., ... & Pandey, P. (2021). The endophytic microbiome as a hotspot of synergistic interactions, with prospects of plant growth promotion. *Biology*, *10*(2), 101. <https://doi.org/10.3390/biology10020101>
- Xian, K., Sang, J., Su, J., Huang, N., Wu, W., He, J., ... & Fu, C. (2025). Microbial Diversity in the Rhizosphere Soils of Three Different Populations of *Paphiopedilum helenae*, a Critically Endangered Wild Orchid. *Microorganisms*, *13*(10), 2282. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13102282>
- Zimmermann, B., Claß-Mahler, I., von Cossel, M., Lewandowski, I., Weik, J., Spiller, A., ... & Bahrs, E. (2021). Mineral-ecological cropping systems—a new approach to improve ecosystem services by farming without chemical synthetic plant protection. *Agronomy*, *11*(9), 1710. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091710>