








Biostimulation of lettuce growth with rhizobacteria in order to produce seedlings in seedbed

Bioestimulación del crecimiento de lechuga con rizobacterias para la producción de plántulas en semillero

Duclas Nicolas , Juan José Almaraz-Suarez* , Raquel Alatorre-Rosas , Sergio Benedicto-Valdes , Vicente Espinosa-Hernandez 

Posgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, 56230, Estado de Mexico, Mexico.

*Corresponding author

E-mail address: jalmaraz@colpos.mx (J.J. Almaraz-Suarez)

Article history:

Received: 9 February 2026 / Received in revised form: 18 April 2026 / Accepted: 6 June 2026 / Published online: 15 June 2026.

<https://doi.org/10.29267/mxjb.2026.11.2.64-76>

ABSTRACT

Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are an alternative for optimizing resources in agricultural crops. Therefore, the effect of five bacterial strains on the growth of lettuce seedlings in seedbeds was evaluated using a 20% Stainer nutrient solution. The experiment included five strains and a control, with four replicates of 20 plants each one. Seedlings were inoculated 3 days after emergence. They were watered with a 20% Stainer nutrient solution. Harvesting took place after 35 days, and the variables evaluated were leaf area, dry weight, and nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) content. *Paenibacillus* BSP1.1 and *Bacillus licheniformis* JP13 were the strains that showed the greatest effects; particularly BSP1.1 increased leaf area by 124.3%, dry weight by 112.5%, and N content by 74.6% compared to the control. The other strains showed lower effects, without statistically outperforming the control. Inoculating seedlings with rhizobacteria such as BSP1.1 and JP13 to stimulate growth can be very useful in obtaining vigorous lettuce seedlings that lead to successful transplanting in the field or in hydroponic systems, considering that lettuce is one of the most consumed leafy vegetables in the world.

Keywords: biofertilizer, crops, fertilization, hydroponics, nutrients.

RESUMEN

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) son una alternativa para optimizar recursos en cultivos agrícolas. Por tal motivo, se evaluó el efecto de cinco cepas bacterianas en el crecimiento de plántulas de lechuga en semilleros a una dosis de 20% de solución nutritiva. El experimento incluyó cinco cepas y un testigo con cuatro repeticiones de 20 plantas cada una. La inoculación de las plántulas se realizó a los 3 días después de la emergencia. Las plántulas se regaron con solución nutritiva Stainer al 20%. Se cosechó a los 35 días y las variables evaluadas fueron área foliar, peso seco, además contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). *Paenibacillus* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 fueron las cepas que presentaron los mayores efectos, particularmente BSP1.1 aumentó 124.3 % el área foliar, 112.5 % el peso seco y 74.6 % el contenido de N comparado con el testigo. Las demás cepas mostraron menores efectos, sin superar estadísticamente al testigo. La inoculación de rizobacterias como BSP1.1 y JP13 en semilleros para estimular crecimiento puede ser de gran utilidad en la obtención de plántulas de lechuga vigorosas que lleven a un trasplante exitoso en campo o en cultivos hidropónicos, considerando que esta es una de las hortalizas de hoja de mayor consumo en el mundo.

Palabras clave: biofertilizantes, cultivos, fertilización, hidroponia, nutrientes.

1. Introducción

La agricultura moderna enfrenta diversos desafíos, como la degradación del suelo, la resistencia a plagas y enfermedades, y la dependencia de insumos químicos para la nutrición de los cultivos (Bisht y Chauhan, 2020). Por lo que es necesaria la búsqueda de alternativas de producción más sostenibles y ecológicas (Hussain *et al.*, 2024). Una de las estrategias más prometedoras es el uso de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV), microorganismos que habitan en las raíces de las plantas y pueden tener efectos positivos sobre el crecimiento y la salud de los cultivos (Nava-López *et al.*, 2017; Aeron *et al.*, 2020). Las rizobacterias son un grupo diverso de bacterias que interactúan con las plantas, promoviendo su crecimiento, mejorando la absorción de nutrientes y protegiéndolas contra patógenos (Khan *et al.*, 2021). Estas bacterias pueden desempeñar varios roles en el suelo, como la fijación de nitrógeno, la producción de hormonas de crecimiento y la competencia con microorganismos patógenos (González-Torres *et al.*, 2017; Timofeeva *et al.*, 2023). Entre las bacterias más conocidas por sus propiedades benéficas para las plantas se encuentran los géneros *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter* y *Bacillus*, los cuales tienen un amplio espectro de actividades bioquímicas que pueden influir en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. El género *Paenibacillus* es conocido por su capacidad de producir compuestos antimicrobianos, promoviendo la defensa de las plantas frente a enfermedades (Dobrzyński y Nازیębło, 2024). Las especies del género *Pseudomonas*, como *P. yamanorum* y *P. tolaasii*, poseen habilidades para promover el crecimiento vegetal y suprimir patógenos del suelo (Zhou *et al.*, 2024). *Arthrobacter pokkali* ha sido identificada como una rizobacteria con propiedades de

biocontrol y tolerancia a condiciones extremas (Wafula *et al.*, 2020). Otras especies como *Bacillus licheniformis* tienen propiedades de solubilización de nutrientes y producción de enzimas que favorecen el crecimiento de las plantas (Ni *et al.*, 2024). La lechuga (*Lactuca sativa*), es una hortaliza de alto valor nutricional y económica, es particularmente susceptible a factores ambientales y enfermedades (Islam *et al.*, 2021). Es una de las hortalizas de hojas de mayor consumo en el mundo, y México ocupa el octavo lugar mundial en producción (FAO, 2025). La lechuga es un cultivo de trasplante, por lo que se requiere producir plántulas vigorosas y sanas en semilleros. Lo cual se logra con el uso masivo de fertilizantes y plaguicidas. El uso de rizobacterias como biofertilizantes y biocontroladores podría representar una solución viable para mejorar calidad y salud de plántulas sin recurrir al uso excesivo de productos químicos. El objetivo fue evaluar el efecto de cinco cepas de rizobacterias (*Paenibacillus sp.* BSP1.1, *Pseudomonas yamanorum* OISf5, *Pseudomonas tolaasii* P61, *Arthrobacter pokkali* JLB4, y *Bacillus licheniformis* JP13) en el crecimiento de lechuga en semillero.

2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación

La investigación se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México (19° 29' LN y 98° 53' LO y una altitud de 2,240 msnm).

2.2. Material vegetal y microbiológico

Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) de la variedad romana, una de las más comunes y ampliamente cultivadas en diversas regiones debido a sus características agronómicas y de consumo.

Se utilizaron cinco cepas de rizobacterias del cepario del Área de Microbiología del Colegio de Postgraduados: *Paenibacillus sp.* BSP1.1, *Pseudomonas yamanorum* OISf5, *Pseudomonas tolaasii* P61, *Arthrobacter pokkali* JLB4, y *Bacillus licheniformis* JP13. Estas cepas promueven crecimiento vegetal en chile serrano (Pineda-Mendoza *et al.*, 2019) y en jitomate (Daza-Martínez *et al.*, 2022). Las cepas se sembraron en cajas Petri que contenían agar nutritivo, y se incubaron a 28°C durante 72 horas. Una vez activas las cepas, se tomó una pequeña cantidad de cultivo colonial y se transfirió a caldo nutritivo, se incubó en un agitador rotatorio a 250 rpm a 28°C durante un período de cuatro días, hasta alcanzar una concentración final de 10⁹ células mL⁻¹.

2.3. Preparación de sustrato y siembra en semilleros

Se preparó una mezcla de perlita y peat moss en una relación de 1:2 y se esterilizó en autoclave a una presión de 18 lbs durante 3 horas. Después de la esterilización, se procedió a llenar semilleros de poliestireno de 20 cavidades y se sembraron 3 semillas de lechuga por cavidad. Los semilleros se humedecieron con agua destilada y se colocaron en invernadero. Una vez que las plántulas emergieron se dejó solo una en cada cavidad.

2.4. Inoculación de cepas de rizobacterias

A los 3 días después de la emergencia, se inoculó cada plántula con 1 mL de una suspensión bacteriana que contenía 10^9 células mL^{-1} ; esto se realizó en cada semillero que correspondía a cada tratamiento de las cepas de rizobacterias. La inoculación se realizó directamente en el pie del tallo de las plántulas. Durante el tiempo que duró el experimento las plántulas se regaron alternadamente con agua destilada y solución Steiner al 20%.

2.5. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron cinco cepas de rizobacterias y un testigo sin inocular, cada uno con cuatro repeticiones, y cada una de estas consistió en un semillero con 20 plántulas. El experimento se estableció en invernadero utilizando un diseño experimental completamente al azar.

2.6. Cosecha y variables estudiadas

La cosecha de las plántulas se realizó en el momento en que el cepellón (el sistema de raíces y sustrato adherido a ellas) se pudo extraer completamente intacto de la celda de siembra sin que se desintegrara. Esto ocurrió cuando las plántulas tenían de 5 a 6 hojas. Se midió el peso seco de las plántulas, tanto de la parte aérea como de las raíces. Para ello, las muestras fueron secadas en un horno con circulación de aire a 70°C durante 72 horas, hasta alcanzar un peso constante. Asimismo, se determinó el área foliar mediante un integrador de área foliar (LI-3000, LI-COR). Además, se midió el peso seco de las raíces. Se analizó el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en la parte aérea de las plántulas.

2.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron usando el software Infostat (versión 2024). Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía, previa verificación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (HSD) para identificar qué tratamientos presentaron diferencias entre sí.

3. Resultados

Se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.0001$) en área foliar, peso seco y contenido de nutrientes en tejidos. La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), mostró que las cepas *Paenibacillus* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 fueron las más efectivas como promotoras del crecimiento vegetal en comparación con el testigo no inoculado y las demás cepas evaluadas.

3.1. Área foliar

En la Figura 1 se muestra que el tratamiento con la cepa *Paenibacillus* BSP1.1 incrementó significativamente el área foliar, alcanzando un promedio de 53.86 cm², lo que representa un aumento del 124.3 % respecto al testigo no inoculado (24.01 cm²).

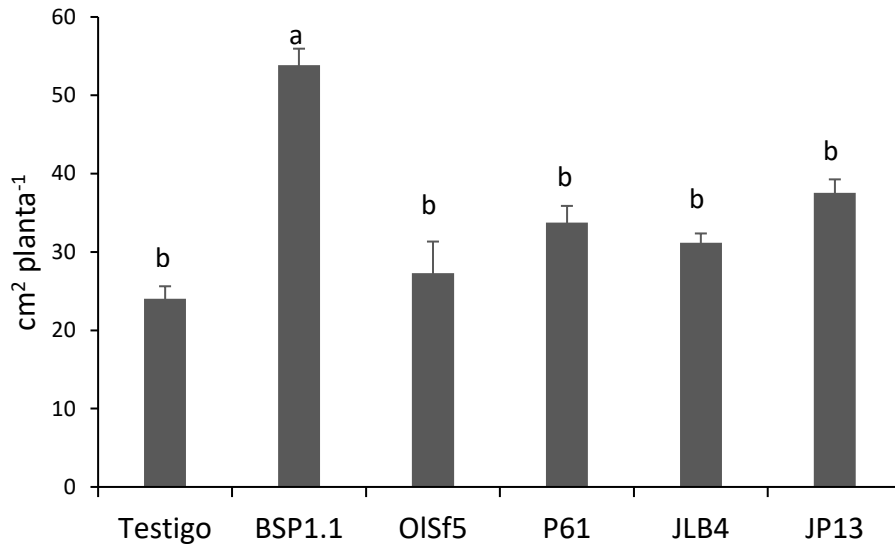


Fig. 1. Efecto de la inoculación de cepas de rizobacterias en el área foliar de plántulas de lechuga. Barras: media \pm error estándar. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Fig. 1. Effect of inoculation with rhizobacterial strains on the leaf area of lettuce seedlings. Bars: mean \pm standard error. Means with the same letter are not significantly different (Tukey, $\alpha = 0.05$).

En contraste, las cepas JP13, P61, JLB4 y OISf5 mostraron incrementos del 56.5 % (37.56 cm²), 40.5 % (33.74 cm²), 29.9 % (31.19 cm²) y 13.6 % (27.28 cm²) en área foliar, respectivamente, pero sin diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo.

3.2. Peso seco de parte aérea y raíz de plantas

El peso seco de la parte aérea se muestra en la Figura 2. El tratamiento con *Paenibacillus* BSP1.1 tuvo un peso seco de 170 mg frente a 80 mg que presentó el testigo, siendo estadísticamente diferente (Tukey, $\alpha = 0.05$), lo que representa un aumento del 112.5 %.

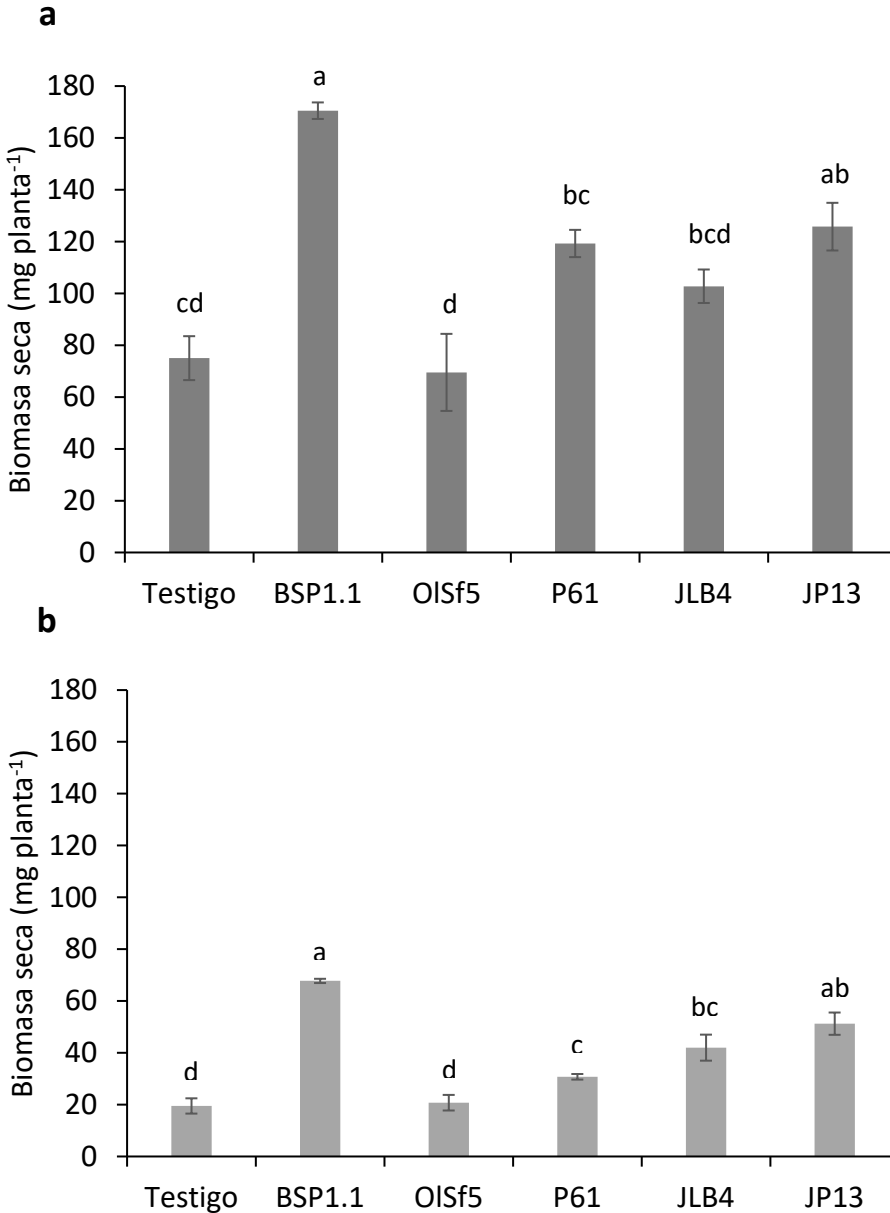


Fig. 2. Efecto de la inoculación con cepas de rizobacterias en plántulas de lechuga. Peso seco de la parte aérea (a), peso seco de raíz (b). Barras: media \pm error estándar. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Fig. 2. Effect of inoculation with rhizobacterial strains on lettuce seedlings. Shoot dry weight (a), root dry weight (b). Bars: mean \pm standard error. Means with the same letter are not significantly different (Tukey, $\alpha = 0.05$).

El tratamiento JP13 también mostró un incremento significativo de 62.5 % en el peso seco de follaje con respecto al testigo. Los tratamientos restantes presentaron incrementos menores o incluso reducciones en comparación con el testigo (Fig. 2a).

Respecto al peso seco de la raíz, los resultados mostraron incrementos marcados por efecto de las cepas (Fig. 2b). El tratamiento con BSP1.1 logró un aumento del 250 % en comparación con el testigo, además de presentar incrementos del 40 %, 75 % y 133 % frente a los tratamientos JP13, JLB4 y P61, respectivamente. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas (Tukey $\alpha = 0.05$).

3.3. Contenido de nitrógeno, potasio y fósforo en planta

La inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) tuvo un efecto positivo sobre el contenido de nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P) en las plántulas de lechuga. En particular, el tratamiento BSP1.1 aumentó el contenido de N, K y P en 74.6 %, 31.9 % y 32.2 % respectivamente, comparado con el testigo. En cambio, OISf5 fue el tratamiento que presentó el menor contenido de N, K y P (Tabla 1). Otros tratamientos como P61, JLB4 y JP13 también mostraron aumentos en N, aunque sin diferencias estadísticas relevantes respecto al testigo.

Tabla 1. Efecto de la inoculación de cepas de rizobacterias en el contenido nutrimental (nitrógeno, fósforo y potasio) de plántulas de lechuga.

Table 1. Effect of inoculation of rhizobacterial strains on the nutrient content (nitrogen, phosphorus and potassium) of lettuce seedlings.

Tratamiento	Contenido N (mg planta ⁻¹)	Contenido K (mg planta ⁻¹)	Contenido P (mg planta ⁻¹)
Testigo	1.48 b	2.01 ab	0.19 a
BSP1.1	2.58 a	2.65 a	0.26 a
OISf5	1.28 b	1.41 b	0.16 a
P61	1.62 b	1.92 ab	0.19 a
JLB4	1.72 ab	2.65 a	0.25 a
JP13	2.08 ab	2.07 ab	0.22 a

Medias con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

4. DISCUSIÓN

EL incremento sustancial en el área foliar por la cepa BSP1.1 (Fig. 1) podría deberse a la mayor absorción de nutrimentos por la raíz (Tabla 1). Varios estudios han reportado que especies del género *Paenibacillus* pueden fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfatos y

producir fitohormonas como ácido indolacético (AIA). Singh y Wesemael (2022) reportaron resultados similares al observar un incremento significativo en el área foliar de plántulas de tomate inoculadas con *Paenibacillus polymyxa* LMG27872, lo que se atribuyó a su capacidad de producir fitohormonas y solubilizar fosfatos, además de su efecto inhibitorio sobre nematodos del género *Meloidogyne*. De forma complementaria, Liu *et al.* (2019) observaron que el uso de *Paenibacillus spp.* en maíz incrementó el área foliar hasta en un 110 %, resultado asociado con una mayor asimilación de nitrógeno y estimulación de la división celular. Es evidente que una mayor área foliar conduce a una capacidad fotosintética de la planta mayor al aumentarse el área de captación de luz, lo que puede resultar en mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes, y favorecer un desarrollo estructural más robusto.

El aumento en la biomasa aérea (Fig. 2a) puede estar relacionado con una mejor asimilación de carbono al tener las plántulas mayor área foliar expuesta a la luz que el testigo (Fig. 1), lo cual es atribuible a la acción de las cepas *Paenibacillus* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 en el aumento de la biomasa radical (Fig. 2b) y la mejora de la nutrición mineral de las plántulas (Tabla 1). Estas dos cepas solubilizan fosfatos y producen auxinas (Pineda-Mendoza *et al.*, 2019 y Daza-Martínez *et al.*, 2022). Otros estudios también respaldan esta observación. Por ejemplo, González-Mancilla *et al.* (2017) reportaron que *Serratia plymuthica* CPPC55 y *Rhizobium nepotum* CPAC35 incrementaron el peso de la parte aérea de chile poblano en más de un 20 % debido a la producción de AIA y la fijación de nitrógeno. De manera más específica, Vetrano *et al.* (2020) demostraron que la inoculación de *Paenibacillus polymyxa* en lechuga cultivada en vivero y campo incrementó significativamente el peso seco de la parte aérea, resultado asociado con una mayor producción de AIA y una activación general del crecimiento vegetal. Además, estudios recientes como el de Qin *et al.* (2024) encontraron que la cepa *P. polymyxa* HL14-3 promovió la acumulación de biomasa en pepino mediante la inducción del cierre estomático por la vía del ácido abscísico (ABA), lo que mejoró la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia al estrés hídrico, manteniendo un crecimiento vegetativo activo. Estos antecedentes confirman que los mecanismos hormonales, nutricionales y fisiológicos inducidos por las cepas BSP1.1 y JP13 son determinantes para la mejora en la acumulación de materia seca aérea.

El efecto positivo de las cepas de RPCV sobre el sistema radical se explica, nuevamente, por la producción de auxinas (Pineda-Mendoza *et al.*, 2019, Daza-Martínez *et al.*, 2022), lo que probablemente estimuló mayor desarrollo de raíces en comparación al testigo. A esto se suma la mejora en la disponibilidad y absorción de nutrientes promovida por *Paenibacillus* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 (Tabla 1). Cazares-Esquivel *et al.* (2023) observaron efectos similares en pak choi, donde la inoculación con la cepa *Arthrobacter pokkali* JLB4 incrementó significativamente la biomasa de raíces.

El nitrógeno es esencial para la síntesis de clorofila, proteínas y ácidos nucleicos, por lo que su incremento en el tratamiento BSP1.1 (Tabla 1) podría explicar el aumento en el área foliar y biomasa aérea (Figs. 1 y 2a). Las RPCV son un amplio grupo de especies que afectan positivamente la nutrición y crecimiento de las plantas a través de diferentes mecanismos como son solubilización de P y K, producción de hormonas vegetales (auxinas, giberelinas y citocininas), fijación de nitrógeno y producción de sideroforos (Khan *et al.*,

2021; Timofeeva *et al.*, 2023). De tal forma que los hallazgos del presente estudio coinciden con lo reportado por Reyes-Castillo *et al.* (2019), quienes mostraron que la inoculación con otras especies de RPCV en tomate mejoró significativamente la acumulación de nitrógeno y la eficiencia de uso del mismo, superando al tratamiento sin inoculación. Igualmente, Wang *et al.* (2020) reportaron un aumento de hasta el 97.7 % en el contenido de N en trigo bajo condiciones de fertilización reducida tras la aplicación de RPCV.

El potasio es un macronutriente esencial para el crecimiento y producción de los cultivos. Participa en diferentes procesos como la síntesis de proteínas y la osmo-regulación de agua en las células de las plantas. Este elemento lo toman las raíces del suelo y su disponibilidad se puede mejorar con el uso de RPCV (Etesami *et al.*, 2017; Damathia *et al.*, 2025). El efecto positivo de los tratamientos BSP1.1 y JLB4 en el contenido de potasio (Tabla 1) sugiere que la inoculación con RPCV favoreció la disponibilidad y absorción de potasio, posiblemente mediante mecanismos de solubilización. Este resultado es coherente con lo señalado por Guajardo-Paz *et al.* (2023), quienes encontraron que las cepas de rizobacterias A1 y A2 aumentaron el contenido de potasio en Golden berry en un 17.9 %, bajo condiciones de baja fertilización. Asimismo, Tian *et al.* (2024) evidenciaron que la cepa *Pantoea vagans* ZHS-1 promovió la solubilización de K en arroz mediante la secreción de ácidos orgánicos, mientras que Wang *et al.* (2020) reportaron un aumento del 42.1 % en el contenido de K en plantas tratadas con RPCV. Las RPCV solubilizan y liberan potasio de fuentes inorgánicas a través de diferentes mecanismos como la producción de ácidos orgánicos, iones hidrógeno y enzimas, además pueden facilitar el intercambio catiónico y quelar el K (Damathia *et al.*, 2025), lo cual puede conducir a mayor absorción radical de este elemento. En conjunto, los resultados reflejan que la aplicación de RPCV en los tratamientos BSP1.1 y JLB4 no solo incrementó significativamente los contenidos de nitrógeno y potasio en plántulas de lechuga, sino que estos efectos se alinean con lo descrito en la literatura científica, confirmando la efectividad de cepas rizobacterianas en la mejora de la nutrición vegetal.

El fósforo es fundamental en procesos fisiológicos como la transferencia de energía (ATP), el desarrollo radical y la formación de tejidos reproductivos. Por lo tanto, un aumento en su acumulación puede estar asociado con una mayor eficiencia metabólica en las plantas inoculadas con RPCV. Esta tendencia observada en el tratamiento BSP1.1 (Tabla 1) es consistente con lo reportado por Cazares-Esquivel, *et al.* (2023), quienes documentaron un aumento significativo en la absorción de fósforo en pak choi tras la inoculación de rizobacterias combinado con fertilizantes químicos. De forma similar, Wang *et al.* (2020) reportaron un incremento del 96.4 % en el contenido de fósforo en trigo, mediante la aplicación combinada de RPCV bajo condiciones de fertilización reducida. La falta de significancia estadística en el contenido de fósforo en este estudio podría atribuirse a diversos factores. El fósforo es un nutriente con baja movilidad en el suelo, y su disponibilidad depende fuertemente de las características fisicoquímicas del suelo o el sustrato utilizado, como el pH, la textura o la presencia de compuestos que lo inmovilizan.

Además, es posible que los requerimientos de fósforo en la etapa de semillero no hayan alcanzado niveles suficientes como para reflejar diferencias marcadas entre tratamientos. También debe considerarse que la eficiencia solubilizadora de las bacterias utilizadas podría no haberse expresado plenamente bajo las condiciones del experimento, ya que el

período de evaluación (35 días) pudo haber sido insuficiente para evidenciar un efecto acumulativo sobre la disponibilidad de este nutriente.

5. Conclusiones

La inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) tuvo un efecto significativo sobre el desarrollo fisiológico y nutricional de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) en etapa de semillero. *Paenibacillus sp.* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 destacaron consistentemente como las más eficaces, mostrando aumentos estadísticamente significativos en área foliar, peso seco de parte aérea y raíz, así como en los contenidos de nitrógeno y potasio. Este efecto puede atribuirse a los múltiples mecanismos de acción característicos de ambas cepas, como la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes y la mejora en la eficiencia del uso de recursos por parte de la planta. La inoculación de *Paenibacillus sp.* BSP1.1 y *Bacillus licheniformis* JP13 en semilleros de lechuga puede representar una estrategia eficaz para reducir el uso de insumos químicos, mejorar la calidad de las plántulas y aumentar la eficiencia del sistema productivo desde las primeras etapas del cultivo.

Agradecimientos

D. Nicolas, agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada durante su Maestría y al Colegio de Postgraduados por el financiamiento para realizar la investigación.

Contribuciones de los autores

Duclas Nicolas: Investigación, curación de datos y redacción – borrador original. **Juan Almaraz-Suarez:** Supervisión, curación de datos, redacción – revisión y edición, visualización, obtención del financiamiento. **Raquel Alatorre-Rosas:** redacción - revisión y edición. **Sergio Benedicto-Valdés:** redacción – revisión y edición. **Vicente Espinosa-Hernández:** redacción – revisión y edición.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de interés

Referencias

Aeron, A., Khare, E., Jha, C.K., Meena, V.S., Aziz, S.M.A. and Islam, M.T., 2020. Revisiting the plant growth-promoting rhizobacteria: lessons from the past and objectives for the future. Arch. Microbiol. 202(4), 665–676. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01779-w>

Bisht, N., Chauhan, P.S., 2020. Excessive and disproportionate use of chemicals cause soil contamination and nutritional stress. In: Larramendy, M.L. and Soloneski, S., (Eds.), Soil Contamination-Threats and Sustainable Solutions, IntechOpen. London, pp. 1–10.

Cazares-Esquivel, S.E., Carballo-Sánchez, M.P. and Almaraz-Suárez, J.J., 2023. Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en parámetros agronómicos y de macronutrientes en pak choi. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 14(4), 633–639. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i4.3118>

Damathia, B., Pathania, D., Jha, A., Sable, H., Sonu, D., Singh, P., Singh, V., Rustagi, S. and Chaudhary, V., 2025. Emergence of potassium solubilizing microbes-assisted crop processing for sustainable food production and microbial complexities. Food Bioprod. Process. 153, 521–535. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.08.003>

Daza-Martínez, Y.M., Almaraz-Suarez, J.J., Rodríguez-Mendoza, M.N., Angulo-Castro, A. and Silva-Rojas, H.V., 2022. Aislamiento de rizobacterias asociadas a tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su potencial para promover crecimiento vegetal. ITEA-Inf. Tec. Econ. Agrar. 118(3), 345–360. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.036>

Dobrzyński, J., Naziębło, A., 2024. *Paenibacillus* as a biocontrol agent for fungal phytopathogens: Is *P. polymyxa* the Only One Worth Attention?. Microb. Ecol. 87(1), 134. <https://doi.org/10.1007/s00248-024-02450-8>

Etesami, H., Emami, S. and Alikhani, H.A., 2017. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - a review. J. Soil Sci. Plant Nutr., 17(4), 897– 911. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005>

FAO, 2025. Estadísticas. <https://www.fao.org/statistics/es> (consultado 11 de diciembre 2025).

González-Mancilla, A., Almaraz-Suárez, J.J., Ferrera-Cerrato, R., Rodríguez-Guzmán, M.P., Taboada-Gaytán, O.R., Trinidad-Santos, A., Alarcón, A. and Arteaga Garibay, R.I., 2017. Caracterización y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de chile poblano (*Capsicum annuum* L.). Rev. Inter. Contam. Amb. 33(3), 463–474. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.09>

González-Torres, H., Rodríguez-Moreno, A.A., María Laura Eugenia Romero-Jaramillo, M.L.E., Segovia-Tagle, V., Paredes-Sánchez, F.A., Karol Karla García-Aguirre, K.K., Herrera-Mayorga, E.V. and Bravo-Luna, L., 2017. Aislamiento e identificación de microorganismos con capacidad de producción de ácido indol-acético en cultivos de cebolla del estado de Zacatecas. Mex. J. Biotechnol. 2(2), 151–160. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.151>

Guajardo-Paz, I., Robledo-Torres, V., Mendoza-Villarreal, R., Hernández-Pérez, A., Sandoval-Villa, M. and Cabrera-De la Fuente, M., 2023. Evaluación de la aplicación de rizobacterias y fertilización química en la producción y calidad del fruto de *Physalis peruviana*. Investigación y Ciencia. 31(90), 1– 14.

Hussain, S., Akhter, R., Maktedar, S.S., 2024. Advancements in sustainable food packaging: from eco-friendly materials to innovative technologies. *Sustainable Food Tech.* 2(5), 1297–1364. <https://doi.org/10.1039/d4fb00084>

Islam, R., Solaiman, A.H.M., Kabir, M.H., Arefin, S.M.A., Azad, M.O.K., Siddiquee, M.H., Alsanius, B.W. and Naznin, M.T., 2021. Evaluation of lettuce growth, yield, and economic viability grown vertically on unutilized building wall in Dhaka City. *Front. Sustain. Cities*, 3, 582431. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.582431>

Khan, N., Ali, S., Shahid, M.A., Mustafa, A., Sayyed, R.Z. and Curá, J.A., 2021. Insights into the interactions among roots, rhizosphere, and rhizobacteria for improving plant growth and tolerance to abiotic stresses: a review. *Cells*, 10(6), 1551. <https://doi.org/10.3390/cells10061551>

Liu, X., Li, Q., Li, Y., Guan, G. and Chen, S., 2019. *Paenibacillus* strains with nitrogen fixation and multiple beneficial properties for promoting plant growth. *PeerJ*, 7, e7445. <https://doi.org/10.7717/peerj.7445>

Nava-López, L.F., Camacho-Millán, R., Aguilar-Medina, E.M., Romero-Navarro, J.G., Sosa-Pérez, R., Ruiz-Abitia, A.I., Cárdenas-Cota, H.M. and Ramos-Payán, R., 2017. Biofertilizer formulation from *Azotobacter* and *Azospirillum* regional isolates and its effect on sugar cane (*Saccharum officinarum*) in greenhouse. *Mex. J. Biotechnol.*, 2(2):183-195. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.183>

Ni, S., Wu, Y., Zhu, N., Leng, F. and Wang, Y., 2024. *Bacillus licheniformis* YB06: A rhizosphere–genome-wide analysis and plant growth-promoting analysis of a plant growth-promoting rhizobacterium isolated from *Codonopsis pilosula*. *Microorganisms*, 12(9), 1861. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091861>

Pineda-Mendoza, D.Y., Almaraz, J.J., Lara-Hernandez, M.E., Arteaga-Garibay, R. and Silva-Rojas, H.V., 2019. Cepas de bacterias aisladas de esporomas de hongos ectomicorrízicos promueven el crecimiento vegetal. *ITEA-Inf. Tec. Econ. Agrar.* 115(1), 4–17. <https://doi.org/10.12706/itea.2018.027>.

Qin, Y., Wang, X., Dong, H., Ye, T., Du, N., Zhang, T., Piao, F., Dong, X., Shen, S. and Guo, Z., 2024. Plant growth-promoting rhizobacteria *Paenibacillus polymyxa* HL14–3 inoculation enhances drought tolerance in *Cucumber* by triggering abscisic acid-mediated stomatal closure. *J. Agric. Food Chem.* 73(1), 260–272. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c09421>

Reyes-Castillo, A., Gerding, M., Oyarzúa, P., Zagal, E., Gerding, J. and Fischer, S., 2019. Plant growth-promoting rhizobacteria able to improve NPK availability: selection, identification and effects on tomato growth. *Chil. J. Agric. Res.* 79(3), 473–485. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392019000300473>

Singh, R.R., Wesemael, W.M., 2022. Endophytic *Paenibacillus polymyxa* LMG27872 inhibits *Meloidogyne incognita* parasitism, promoting tomato growth through a dose-dependent effect. *Front. Plant Sci.* 13, 961085. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.961085>

Tian, S., Xu, Y., Zhong, Y., Qiao, Y., Wang, D., Wu, L., Yang, X., Yang, M. and Wu, Z., 2024. Exploring the organic acid secretion pathway and potassium solubilization ability of *Pantoea vagans* ZHS-1 for enhanced rice growth. *Plants*, 13(14), 1945. <https://doi.org/10.3390/plants13141945>

Timofeeva, A.M., Galyamova, M.R. and Sedykh, S.E., 2023. Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants (Basel)*, 12(24), 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>

Vetrano, F., Miceli, C., Angileri, V., Frangipane, B., Moncada, A. and Miceli, A., 2020. Effect of bacterial inoculum and fertigation management on nursery and field production of lettuce plants. *Agronomy*, 10(10), 1477. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101477>

Wafula, E.N., Murunga, S.I., Nalinya-Wafula, E., Murunga, S.I. and Wafula, E.N., 2020. Isolation and identification of phosphate solubilizing and nitrogen-fixing bacteria from lake Ol'Bolossat sediments, Kenya. *Mod. Appl. Sci.* 14(10), 5539. <https://doi.org/10.5539/mas.v14n10p37>

Wang, J., Li, R., Zhang, H., Wei, G. and Li, Z., 2020. Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application. *BMC Microbiol.* 20(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-1708-z>

Zhou, L., Höfte, M. and Hennessy, R.C., 2024. Does regulation hold the key to optimizing lipopeptide production in *Pseudomonas* for biotechnology?. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 12, 1363183. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1363183>