Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Caracterización de Rizobacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal asociadas a la Halófita *Suaeda* sp.

Sáenz-Mata J.[1]; Coria-Arellano J. L.[2]; Borroel-García V. J.[3]; Macias-Cortés E.[4]; Valdés-Nieblas J. A.[5]

Datos de Adscripción:

[1] Jorge Sáenz Mata. Laboratorio De Ecología Microbiana, Facultad De Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Del Estado De Durango. jsaenz_mata@hotmail.com https://orcid.org/0000-0001-9958-9676

[2] Jessica Lizbeth Coria Arellano. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ingeniería Industrial. alejandro.valdes@itslerdo.edu.mx https://orcid.org/0000-0003-4581-0122

[3] Victoria Jared Borroel García. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ingeniería Ambiental. victoria.bg@itslerdo.edu.mx https://orcid.org/0000-0003-1752-5586

[4] Elizabeth Macías Cortés. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Dpto. de Posgrado. elizabeth.mc@itslerdo.edu.mx https://orcid.org/0000-0003-4536-3588

[5]Jesús Alejandro Valdés Nieblas. Tecnológico Nacional de México (TecNM), Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico N° 1555 Sur. Periférico Lerdo Km. 14.5, Plácido Domingo, Ciudad Lerdo, Durango, México, CP. 35150. alejandro.valdes@itslerdo.edu.mx. https://orcid.org/0009-0000-8184-3349

Resumen **- La interrelación entre plantas y microorganismos del suelo, conocida como el "segundo genoma", es fundamental para la salud vegetal. Esta investigación se centra en rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), aisladas de *Suaeda* sp.. Se obtuvieron 77 cepas bacterianas utilizando medios de cultivo con y sin sal (NFb, LB y KB). Posteriormente, se evaluó su efecto en *Arabidopsis thaliana* mediante ensayos in vitro en placas Petri (por triplicado), utilizando suspensiones bacterianas de 1x10⁸ UFC/ml y pepino (*Cucumis sativus*) en charola de germinación (10 repeticiones x tratamiento). Seis cepas favorecieron el desarrollo de raíces secundarias, según un análisis estadístico ANOVA con prueba de Tukey (P=0.05). La identificación de los bacteria islotes se realizó mediante secuenciación del gen 16S rDNA, y se evaluaron parámetros bioquímicos clave como la solubilización de fosfatos, la producción de sideróforos y del ácido indolacético (AIA), confirmando su potencial como biofertilizantes en la agricultura sustentable. Los hallazgos confirman que las cepas seleccionadas poseen características clave para promover el crecimiento vegetal en condiciones salinas, respaldando su potencial uso en agricultura sustentable.**

Palabras clave: PGPR, Suaeda sp, Arabidopsis thaliana, Cucumis sativus.

Abstract **- The interaction between plants and soil microorganisms—often referred to as the "second genome"—plays a fundamental role in plant health. This study investigated plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from *Suaeda* sp. A total of 77 bacterial strains were obtained using selective culture media with and without salt (NFb, LB, and KB). Their effects on *Arabidopsis thaliana* were assessed through in vitro assays on Petri dishes (in triplicate) with bacterial suspensions of 1×10⁸ CFU/ml, and on cucumber (*Cucumis sativus*) in germination trays (10 replicates per treatment). Six strains significantly enhanced the development of secondary roots, as determined by ANOVA followed by Tukey's test (P = 0.05). These strains were identified by 16S rDNA sequencing, and their biochemical traits—including phosphate solubilization, siderophore production, and indole-3-acetic acid (IAA) synthesis—were characterized. Collectively, the results highlight the potential of these strains as biofertilizers capable of promoting plant growth under saline conditions, supporting their application in sustainable agriculture.**

Keywords: Arabidopsis thaliana, Cucumis sativus, PGPR, Suaeda sp.

I. INTRODUCCIÓN

La amplia diversidad de plantas presentes en la naturaleza brinda múltiples hábitats para el desarrollo de microorganismos; en una planta se pueden identificar tres hábitats, la filósfera, endosfera y rizósfera. El suelo es considerado un importante reservorio de actividad microbiana y en particular el espacio entre el suelo y la raíz (rizósfera) es uno de los ecosistemas terrestres más complejos y con mayor actividad microbiana (Johansson et al., 2004).

Los microorganismos presentes en la rizósfera intervienen en los ciclos de los nutrientes en el sistema suelo-planta. La abundancia y actividades de microorganismos del suelo se ve influenciada por el tipo de suelo, disponibilidad de nutrientes, pH, textura y contenido de materia orgánica (Singh y Mukerji, 2006). La rizósfera se subdivide en tres zonas (Clark 1949; Lynch 1987; Pinton et al. 2001):

1. Endorizósfera: se conforma del tejido de raíz, endodermis y capas corticales.
2. Rizoplano: es la superficie de la raíz, ahí se encuentran partículas del suelo y microbios. Está formada por epidermis, córtex y capa de polisacárido mucilaginoso.
3. Ectorizósfera: es el suelo inmediato a la raíz.

Entre los microorganismos y agentes rizosféricos se encuentran bacterias, hongos, nematodos, protozoos, algas y microartrópodos (Johansson et al., 2004). La gran diversidad microbiana concerniente con la raíz de las plantas es de decenas de miles de especies. La relación entre las plantas y los microorganismos que viven a su alrededor se conoce como su segundo genoma, porque es clave para mantenerlas sanas y puede cambiar los microbios que habitan en sus raíces, debido a que hay comunidades microbianas específicas en diversas especies de plantas cultivadas en el mismo suelo (Berendsen et al., 2012).

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID053

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

La comunidad de microorganismos con efectos positivos sobre las plantas tiene algunos efectos como: la influencia en el crecimiento y desarrollo, regulación de la actividad metabólica de la raíz, influencia en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como la tolerancia a estreses bióticos y abióticos (González, 2005). Aquí, se encuentran las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), que ayudan al crecimiento de las plantas por varios mecanismos (Caballero, 2006). Estas bacterias pueden promover el crecimiento vegetal de forma directa o indirecta (Glick, 1995), las cuales, al interactuar con diferentes tipos de plantas, han demostrado ser especialmente relevantes en ambientes extremos. Tal es el caso de las zonas áridas, donde especies halófilas logran sobrevivir gracias, en parte, a relaciones simbióticas con microorganismos como las RPCV, las cuales se denominan "halófitas". Se desarrollan naturalmente y son capaces de completar su ciclo de vida en suelos donde las concentraciones de sal son alrededor de 200 mM NaCl o más (Flowers et al., 2008; Ness, 2003).

En la actualidad los productores están interesados en la búsqueda de nuevos sistemas de producción que incrementen los rendimientos y generen productos de excelente calidad (Santiago-López et al., 2016). Debido a lo anterior, han surgido insumos agrícolas con base en microorganismos y otros materiales de origen orgánico, por ejemplo, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) (Kloepper y Schroth, 1978) y los sustratos a base de compost (Raviv, 2015), como opciones que fortalecen el enfoque de la agricultura sustentable (Pretty, 2008).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Ubicación del experimento

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ecología Microbiana en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UJED, Gómez Palacio, Dgo.

2.2 Resistencia a salinidad

Para evaluar el efecto promotor de crecimiento, se utilizaron semillas de *Arabidopsis thaliana* y *Cuccumis sativus*. En el caso de las primeras, se pasaron a cajas Petri con medio MS 0.2 X suplementado con NaCl al 3%, con tres repeticiones por tratamiento, siendo en total 6 tratamientos, 1 control.
Se prepararon medios de cultivo con concentraciones de 5%, 10%, 15% y 20% de NaCl, con el propósito de evaluar la resistencia de las bacterias halófilas a diferentes niveles de salinidad.

2.3 Confrontaciones con Arabidopsis thaliana

Los 6 tratamientos bacterianos se reactivaron en medio de cultivo agar Luria Bertani (LB) a 28°C x 3 días. Se identificaron con las siguientes claves: Endo0(3) KBss, Endo0(14) KBcs, Endo100(2) NFBss, Endo10(4) LBss y Endo0(4) LBcs.
Para trabajar las semillas de *A. thaliana*, se desinfectaron con etanol 96% por siete minutos e hipoclorito de sodio 20% por cinco minutos, enjuagando con agua destilada estéril cinco veces. Las cuales se llevaron a vernalización a 4°C durante dos días. Posterior a ese tiempo se colocaron para su germinación en series de seis semillas por placa Petri con medio MS 0.2X [1% (w/v) agar, 0.75% (w/v) sacarosa, pH 7.0], dentro de una cámara de crecimiento para plantas (Percival Scientific AR-95L) bajo un fotoperiodo de 16 horas luz, 8 horas oscuridad, intensidad de luz de 100 µmol m2s-1 y temperatura, durante seis días, con una inclinación de 70° permitiendo el crecimiento gravitrópico de la raíz. Posterior a ese tiempo se llevó a cabo la inoculación de la concentración bacteriana $1X10^8$ UFC mL^{-1} con la ayuda de un asa bacteriológica, tomando una distancia de 5 cm por debajo de la punta radicular, esto para la evaluación de compuestos orgánicos difusibles. Las cajas Petri se devolvieron a la cámara bioclimática bajo las mismas condiciones de crecimiento usadas en la germinación (el experimento se realizó con 3 repeticiones por tratamiento). Seis días posteriores a la inoculación, se evaluaron los siguientes parámetros: peso fresco, longitud de raíz principal y número de raíces secundarias.

2.4 Promoción de crecimiento vegetal en Cucumis Sativus

Para el experimento realizado en charolas de germinación, se prepararon los inóculos de las cepas ajustando la concentración a $1X10^8$ UFC mL^{-1} con buffer fosfato salino al 0.5X (Espinoza et al., 2017), en dónde se pusieron en agitación las semillas de *Cucumis sativus* previamente desinfectadas (etanol 96% por siete minutos e hipoclorito de sodio 20% por cinco minutos), en una incubadora durante 2 h a 29 ± 2 °C, con agitación de 2 rpm (Precisión Scientific 815®). Una vez habiendo transcurrido 2 h, se procedió con la siembra de la semilla inoculada, esto utilizando una charola para germinación (200 cavidades de 3.1 cm x 3.1 cm de lado, 7.0 cm de alto, drenaje de 5 mm) en peat moss (sustrato:perlita:vermiculita 1:1:1) con diez repeticiones por tratamiento, bajo condiciones de oscuridad y a temperatura ambiente por siete días.

Pasado el periodo de germinación, se movió la charola a invernadero, con un riego abundante por la mañana y otro por la noche utilizando agua corriente. A los 20 días de la siembra se aplicó una inoculación previamente preparada igual que la utilizada en la etapa de semilla, la cual se aplicó de forma directa a la raíz de las plantas en lugar del riego de la mañana hasta capacidad de campo. Después de transcurridos 30 días desde la siembra, se midieron los siguientes parámetros: altura de la planta, grosor del tallo, peso en fresco, peso en seco, longitud de la raíz principal y cantidad de raíces secundarias.

2.5 Mecanismos de promoción de crecimiento vegetal usados por los aislados

Para determinar los mecanismos usados por las cepas aisladas se sometieron a pruebas bioquímicas, para medir la producción de ácido indol acético por método colorimétrico técnica de Salkowsky modificado (Brick et al., 1991); producción de sideróforos con la técnica de Chrome azurol S (Schwyn y Neilands, 1987); y solubilización de fosfatos en medio de cultivo selectivo NBRIP (National Botanical Research Institute Phosphate growth médium) (Nautiyal, 1999).

2.6 Análisis estadístico

Los parámetros planteados para la evaluación del efecto de las inoculaciones sobre las plantas se analizaron con un diseño experimental completamente al azar, por un análisis de ANOVA seguido de una prueba T de Tukey con una P = 0.05. El programa usado para el análisis fue GraphPad Prism 6.Ink.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID053
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

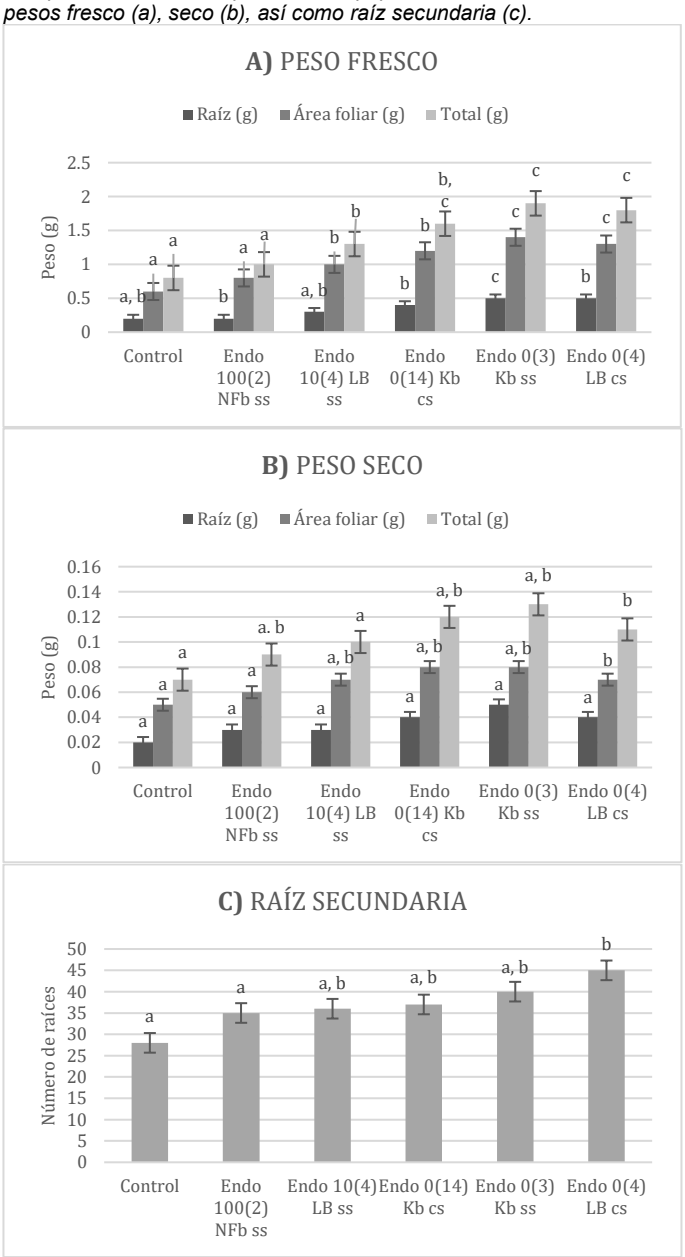
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Confrontación con A. thaliana

Para evaluar el efecto de las cepas sobre *A. thaliana*, las inoculaciones fueron realizadas por triplicado, con 6 plántulas por caja y un control (tres repeticiones). Como se muestra en la Figura 1, hay mayor desempeño tanto en peso fresco como peso seco y raíces secundarias. Sobre todo, las cepas Endo0(3) Kbss y Endo0(4) LBcs en el primer caso, Endo0(4) LBcs para el segundo y último, seguido de los demás tratamientos.

Figura 1
Comportamiento de las plántulas de pepino inoculadas, en relación con pesos fresco (a), seco (b), así como raíz secundaria (c).



Los resultados muestran tres parámetros de desarrollo vegetal (peso fresco, peso seco y número de raíces secundarias) de *Cucumis sativus* (pepino) bajo los diferentes tratamientos bacterianos, comparados con un control sin inoculación.

1. Peso Fresco (g)

a) Las inoculaciones Endo 0(14) Kbcs y Endo 0(4) LB cs presentaron los valores más altos de peso fresco total, superando significativamente al control.
b) El tratamiento Endo 10(4) LB ss también mostró aumento, aunque ligeramente menor.
c) El control y Endo100(2) NFbss registraron los valores más bajos.

Las letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA con Tukey, P=0.05).

2. Peso Seco (g)

a) El peso seco total fue mayor en los tratamientos bacterianos que en el control.
b) En particular, Endo0(4) LBcs y Endo0(14) Kbcs mostraron el mejor desarrollo.
c) Los tratamientos bacterianos Endo10(4) LBss y Endo0(3) Kbss también evidenciaron un efecto positivo, aunque menor.
d) El control tuvo los valores más bajos, indicando que la inoculación bacteriana mejora significativamente la biomasa seca.

3. Número de Raíces Secundarias

a) El tratamiento Endo 0(4) LB cs promovió la mayor cantidad de raíces secundarias, con diferencias significativas respecto al control.
b) Los demás tratamientos, aunque aumentaron el número de raíces en comparación con el control, no presentaron diferencias estadísticas tan marcadas.

La inoculación bacteriana en *Cucumis sativus* mostró efectos positivos en el desarrollo de la planta, destacando mejoras significativas en el peso fresco, peso seco y número de raíces secundarias en comparación con el control. Entre los tratamientos evaluados, Endo0(4) LBcs presentó el mayor impacto en la biomasa total y en la formación de raíces secundarias, lo que sugiere su alto potencial como promotor de crecimiento vegetal. Los resultados obtenidos en *Cucumis sativus* coinciden con estudios previos que demuestran el impacto positivo de las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV) en diversos cultivos. Tal como lo reportaron investigaciones en *Phaseolus vulgaris* var. Mantequilla, donde la inoculación de un consorcio bacteriano incrementó el contenido de nitrógeno, el crecimiento y el rendimiento (Granda-Mora *et al*., 2024).

El presente estudio, la cepa Endo0(4) LBcs mejoró significativamente la biomasa y el desarrollo radicular. Ambos hallazgos refuerzan la importancia del uso de RPCV como una estrategia viable para optimizar el crecimiento vegetal, mejorar el rendimiento agrícola y reducir la dependencia de fertilizantes químicos, lo que contribuye a prácticas agrícolas más sustentables.

3.2 Prueba de halotolerancia

Para la evaluación de la resistencia a la salinidad que manejaban las cepas evaluadas, se hizo una inoculación en medio enriquecido con diferentes concentraciones de NaCl (5, 10, 15, 20%), lo que mostró que las cepas más tolerantes fueron

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID053

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Endo 10(4)LBss y Endo0(14) Kbcs, tal como se observa en la Figura 2. Siendo capaces de crecer en una concentración máxima de 15% NaCl (48 h), lo anterior evidencía la tolerancia a dicho mineral. Para ello se ha encontrado que diversos géneros toleran concentraciones que van desde 5 – 10 % NaCl (Flores et al., 2023; Rodríguez et al., 2020; Damodaran et al., 2013). En un estudio reciente desarrollado por Pérez-García et al. (2025) probaron la tolerancia al NaCl de las cepas *Sinorhizobium meliloti, Acinetobacter radioresistens, Pseudomonas paralactis* y *Bacillus cereus* en medio de cfrecimiednto enriquecido con hasta 20% NaCl, donde encontraron que todas ellas eran capaces de tolerar hasta 15% de salinidad, lo cuál coincide con la tolerancia máxima alcanzada en el presente estudio.

Figura 2
Prueba de resistencia a la salinidad

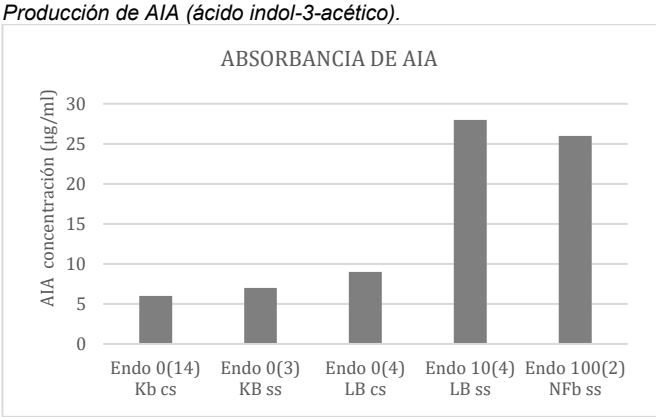
Cepa	5% NaCl	10% NaCl	15% NaCl	20% NaCl
Endo100(2) Nfbss	+	-	-	-
Endo10(4) LBss	+	+	+	-
Endo 0(14) Kbcs	+	+	+	-
Endo0(3) Kbss	+	-	-	-
Endo0(4) LBcs	+	+	-	-

Nota. El símbolo "+" representa crecimiento positivo y el signo" representa crecimiento negativo.

3.3 Prueba de ácido acético

Para la prueba bioquímica de producción de ácido indól-acético (AIA), se reflejó que las cinco cepas previamente seleccionadas tuvieron producción de esta fitohormona, lo cual se muestra en la Figura 3, donde la cepa Endo(10)4 LBss y Endo(100)2 NFbss son las que mayor cantidad de IAA produjeron, con 27.857 y 28.492 µg/mL respectivamente.

Figura 3
Producción de AIA (ácido indol-3-acético).



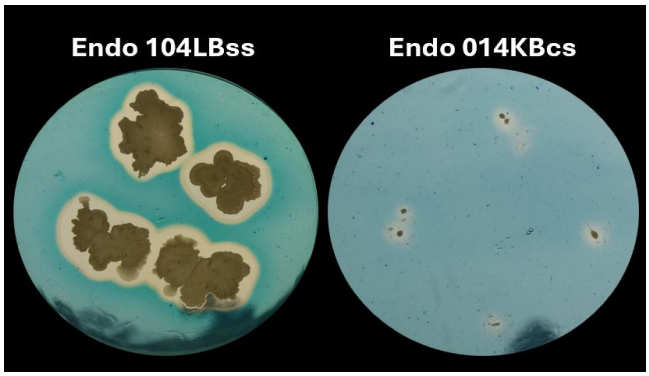
Debido a la capacidad de las RPCV de colonizar los tejidos radiculares y estimular el alargamiento y ramificación de raíces, los resultados obtenidos coinciden con Rodríguez et al. (2021) donde encontraron que *Bacillus megaterium, Burkholderia* sp. y *Serratia marcescens* eran capaces de producir dichos compuestos, lo cual concordaba con el desarrollo vigoroso de plántulas de tomate. Así mismo, Hernández et al. (2004) encontraron que un aislado de *Burkholderia cepacia* produjo 21.53 µg/mL AIA. Con lo que se demuestra que uno de los aportes más importantes de la BPCV es la producción de metabolitos de AIA, lo que hace que su uso sea eficiente en la producción vegetal de los diversos cultivos de interés agrícola.

3.4 Prueba de Sideróforos

Para la producción de sideróforos la cepa Endo10(4) LBss y la Endo0(3) Kbss (Figura 6) dieron positivo a este mecanismo, lo cual se determinó por medio de la formación de un halo alrededor del inóculo bacteriano como se observa en la Figura 4. Este mecanismo es importante por su efecto como acción antagónica, apoyo en condiciones de estrés y favorecimiento del crecimiento vegetal. Tal y como lo menciona Garcia et al. (2020) en su estudio, donde las cepas *Bacillus paralicheniformis, Acinetobacter guillouiae Aeromonas caviae* y *Pseudomonas lini*, dieron positivo a dicha prueba.
Las cepas Endo100(2) NFbss, Endo0(14) Kbcs, y Endo0(4) LBcs no mostraron producción de sideróforos.

Los sideróforos son moléculas clave que facilitan la absorción de hierro por las plantas, lo que favorece su desarrollo, especialmente en suelos con baja disponibilidad de este nutriente. Por lo que las cepas que dieron positivo infieren un mayor potencial como promotoras de crecimiento vegetal gracias a esta capacidad, sugiriendo que podrían ser candidatas prometedoras para formular biofertilizantes, ya que, al producir sideróforos, mejoran la nutrición férrica del pepino, mientras que las otras cepas probablemente no tengan ese beneficio directo.

Figura 4
Halos formados por las dos cepas más representativas en la prueba de Producción de sideróforos en medio CAS.



Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden con lo reportado por Islas-Lugo et al. (2024), quienes encontraron que 9 de las 10 cepas bacterianas evaluadas presentaron producción de sideróforos, evidenciada por la formación de halos claros en el medio CAS. Lo que refuerza la importancia de esta propiedad como un mecanismo clave para mejorar la captación de hierro por las plantas y, en consecuencia, favorecer su desarrollo. La presencia consistente de sideróforos en diferentes estudios sugiere que esta característica puede ser determinante al seleccionar cepas bacterianas con potencial biofertilizante, especialmente en suelos con limitaciones nutricionales. Sultana et al. (2021) presentaron cepas bacterianas halotolerantes aisladas de campos de arroz, donde *Bacillus aryabhattai* MS3 mostró una alta producción de sideróforos, incluso bajo

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID053
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

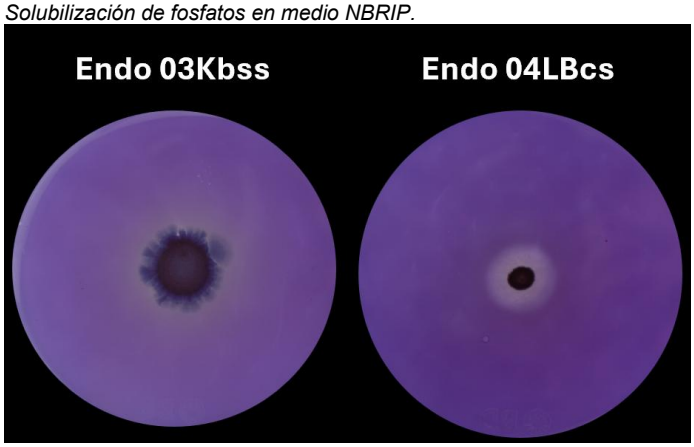
condiciones salinas e iron-límite, evidenciada mediante un halo en medio CAS; por otra parte Li et al. (2024) revisaron el rol de sideróforos en PGPR y su capacidad para mejorar la nutrición de hierro en plantas como el pepino (*Cucumis sativus*), indicando que la producción de sideróforos es un mecanismo clave para promover la absorción de hierro bajo condiciones limitantes.

3.5 Prueba de Solubilización de Fosfatos

En cuanto a la Solubilización de fosfatos la cepa Endo0(3) Kbss y Endo0(4) LBcs (Figura 6), fueron las que mostraron efecto positivo, el cual es esencial para incorporar el fósforo en su forma soluble $Ca_3(PO4)_2$, y por ende reducir la dependencia de fertilizantes químicos, ayudar en la formación de raíces, en el proceso de floración, el desarrollo de frutos y la transferencia de energía (ATP). En concordancia con la presente investigación, Rodríguez et al. (2021), identificó en su estudio que *Pseudomonas sp. Bacillus megaterium*. *Serratia marcescens Bacillus sp.,* presentaban eficiencia en solubilización.

Figura 5

Halos formados por las dos cepas más representativas en la prueba de Solubilización de fosfatos en medio NBRIP.



En relación con la solubilización de fosfatos, los resultados de esta investigación encuentran sustento en el estudio de Islas-Lugo et al. (2024), quienes reportaron que cinco de las cepas evaluadas presentaron actividad solubilizadora en el medio NBRIP, destacando la cepa CHS20 por formar un halo translúcido alrededor de la colonia, indicador de una alta capacidad de solubilización. De manera similar, en este trabajo se observó que las cepas Endo0(3) Kbss y Endo0(4) LBcs mostraron actividad positiva para la solubilización de fosfatos, lo que confirma su potencial como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

La capacidad de solubilizar fosfatos es una característica altamente valorada, ya que permite mejorar la disponibilidad de este nutriente esencial para las plantas, especialmente en suelos donde el fósforo se encuentra en formas poco accesibles. Estos hallazgos refuerzan la importancia de seleccionar cepas con esta propiedad para su aplicación en biofertilizantes sustentables.
Wahid et al. (2020) describen el uso de bacterias solubilizadoras de fosfatos en suelos calcáreos, demostrando su eficacia para mejorar la disponibilidad de fósforo y la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Por su parte, Maldonado et al. (2020) reportan aislamientos de rizobacterias solubilizadoras provenientes de zonas áridas, que no solo solubilizan fosfatos (con valores entre 608.9 y 781.4 mg/L), sino que también estimulan el crecimiento en plantas de lechuga y tomate. En otro estudio, Mendizabal-Reliz et al. (2023) evidencian que la inoculación con cepas de *Rhizobium* sp. *B02* mejora la movilización de fósforo en suelos y aumenta el contenido de fósforo y la biomasa en maíz bajo condiciones de fertilización reducida.

Figura 6

Pruebas bioquímicas: Producción de AIA, Producción de sideróforos y solubilización de fosfatos.

Cepa	Producción de AIA	Producción de sideróforos	Solubilización de fosfatos
Endo100(2) Nfbss	+	-	-
Endo10(4) LBss	+	+	-
Endo0(14) Kbcs	+	-	-
Endo0(3) Kbss	+	+	+
Endo0(4) LBcs	+	-	+

Nota. El símbolo "+" representa crecimiento positivo y el signo "– "representa crecimiento negativo.

3.6 Identificación molecular de bacterias

Para la identificación de las especies de las cepas trabajadas, se realizó extracción de DNA y amplificación del gen 16S por medio de PCR, usando los primers 27 F y 1492 R, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 7.

Figura 7

Identificación molecular.

ID	Closet species (% ident)
Endo0(4) LBcs	*Brevibacterium halotolerans*
Endo0(3) Kbss	*Bacillus endophyticus*
Endo0(14) Kbcs	*Virgibacillus salarius*
Endo 100(2) NFbss	*Leclercia adecarboxylata*
Endo10(4) LBss	*Virgibacillus salarius*

Según estudios realizados por Egamberdieva et al. (2017) señalan que *Brevibacterium halotolerans* es una BPCV capaz de soportar altas concentraciones de NaCl, además de ser una bacteria productora de ACC-desaminasa; para la especie *Bacillus endophyticus* estudios por Lee et al. (2012) la caracterizan como una RPCV (PGPR por sus siglas en inglés) utilizada como biocontrolador; para *Virgibacillus salarius* estudios por Mapelli et al. (2013) la identificaron como PGPV solubilizadora de fosfatos; finalmente para la especie *Leclercia adecarboxylata* investigaciones hechas por Naveed et al. (2014), la identifican como una PGPV capaz de solubilizar fosfatos. Dichas investigaciones coinciden con los resultados obtenidos de las cinco cepas seleccionadas como promotoras de crecimiento vegetal (Tabla 3).

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirman la relevancia de la interacción entre plantas y microorganismos del suelo para el desarrollo vegetal, destacando el potencial de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) aisladas de *Suaeda*

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID053
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

sp. Las seis cepas seleccionadas demostraron efectos positivos significativos en la formación de raíces secundarias, así como en la producción de compuestos clave como fosfato soluble, sideróforos y ácido indolacético.
En conclusión, la investigación subraya el potencial de las RPCV como bioinoculantes viables que pueden reemplazar a los fertilizantes químicos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y mejorando el crecimiento y la salud de las plantas. De igual forma, resalta la capacidad de estos microorganismos a desarrollarse bajo diferentes concentraciones de NaCl, lo cual es una herramienta valiosa para mejorar la productividad en suelos con problemas de salinidad.
Se recomiendan estudios adicionales para explorar su aplicación en diversos entornos agrícolas y evaluar sus efectos a largo plazo en el suelo y los ecosistemas vegetales.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a la Facultad de Ciencias Biológicas de la UJED, Gómez P. Dgo., y su laboratorio de Ecología Microbiana.
Así como, nuestro reconocimiento al Instituto Tecnológico de Lerdo, por las facilidades otorgadas en infraestructura, recursos académicos y colaboración institucional, elementos clave para el desarrollo de este trabajo.
Finalmente, agradecemos a todos los colegas, técnicos y estudiantes que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al éxito de este proyecto.

VI. REFERENCIAS

Ahmed, I., Aktar, M. W., Akter, N., & Rahman, S. M. (2021). Screening of siderophore-producing salt-tolerant rhizobacteria suitable for supporting plant growth in saline soils with iron limitation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4, 100150. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100150

Alzate Zuluaga MY, Fattorini R, Cesco S and Pii Y (2024) Plant-microbe interactions in the rhizosphere for smarter and more sustainable crop fertilization: the case of PGPR-based biofertilizers. *Front. Microbiol*. 15:1440978. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440978

Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. Trends in Plant Science, 17(8), 478–486. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001

Brick J.M., Bostock R.M. y Silverstone S.E. (1991). Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Applied and Environmental Microbiology* 57 (2), 535-538. https://doi.org/10.1128/aem.57.2.535-538.1991

Caballero-Mellado, J. (2006). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y su aplicación en la agricultura sustentable. Instituto Politécnico Nacional (IPN), Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada.

Damodaran, T., Sah, V., Rai, R. B., Sharma, D. K., Mishra, V. K., Jha, S. K., & Kannan, R. (2013). Isolation of salt tolerant endophytic and rhizospheric bacteria by natural selection and screening for promising plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and growth vigour in tomato under sodic environment. *Afr. J. Microbiol. Res*, 7(44), 5082-5089. https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6003

Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd_Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: essential components for plants to balance stress and fitness. Frontiers in Microbiology, 8, 2104. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104

Flores Clavo, R., Valladolid-Suyón, E., Reinoza-Farroñan, K., Asmat Ortega, C., Riboldi Monteiro, P. H., Apaza-Castillo, G. A., ... & Carreño-Farfán, C. R. (2023). Rhizobacterial isolates from Prosopis limensis promote the growth of Raphanus sativus L. under salt stress. *Current Microbiology*, *80*(8), 269. https://doi.org/10.1007/s00284-023-03379-w

Flowers, T. J., Galal, H. K., & Bromham, L. (2008). Evolution of halophytes: Multiple origins of salt tolerance in land plants. Functional Plant Biology, 35(7), 604–607. https://doi.org/10.1071/FP08055

Francis E. Clark, Soil Microorganisms and Plant Roots, Editor(s): A.G. Norman, Advances in Agronomy, Academic Press, Volume 1, 1949, Pages 241-288, ISSN 0065-2113, ISBN 9780120007011, https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60750-6.

García Mendoza, V., Hernández Vázquez, A. E., Reyes Carrillo, J. L., Figueroa Viramontes, U., Sáenz Mata, J., Quiroga Garza, H. M., ... & García Martínez, J. E. (2020). Las rizobacterias halófilas mantienen la calidad forrajera de Moringa oleifera cultivada en sustrato salino. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, *11*(3), 718-737. https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i3.5175

Glick BR (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*. 41(2): 109-117. https://doi.org/10.1139/m95-015

González, M. T. (2005). Microorganismos benéficos y su impacto en el desarrollo vegetal. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Parasitología Agrícola.

Granda-Mora, K., Correa-Ullauri, C., Collahuazo-Reinoso, Y., & Robles-Carrión, Á. (2024). Inoculantes microbianos comerciales con PGPR sobre variables productivas y económicas de fríjol común (Phaseolus vulgaris L.). *Agronomía Mesoamericana*, *35*(1). https://doi.org/10.15517/am.2024.55654

Johansson, J. F., Paul, L. R., & Finlay, R. D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS microbiology ecology*, *48*(1), 1-13. https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012

Hernández, A., Rives, N., Caballero, A., Hernández, A. N., & Heydrich, M. (2004). Caracterización de rizobacterias asociadas al cultivo del maíz en la producción de metabolitos del tipo AIA, sideróforos y ácido salicílico. *Revista Colombiana de biotecnología*, *6*(1), 6-13. https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/536/1032

Islas-Lugo, F., Gutiérrez-García, V., Cruz-Arredondo, A., Ríos-Muñiz, D. E., & Evangelista-Martínez, Z. (2024). Evaluación de la capacidad promotora del crecimiento vegetal y actividad antagonista contra hongos fitopatógenos de las bacterias

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Streptomyces. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad*, *2*(2), 137-148. https://doi.org/10.5281/zenodo.12766054

Kloepper, J. W. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In *Proc. of the 4th Internet. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie, INRA, Angers, France, 1978* (Vol. 2, pp. 879-882). : https://www.researchgate.net/publication/284682983

Lee, Y.-J., Kim, Y.-S., Hwangbo, H., Park, R.-D., Jeon, Y.-D., Song, C. H., & Kim, K.-Y. (2012). *Bacillus endophyticus*, a novel plant growth-promoting endophytic bacterium with antifungal activity against phytopathogens. Journal of Microbiology and Biotechnology, 22(12), 1601–1607. https://doi.org/10.4014/jmb.1207.07003

Li, N., Wang, X. X., Xue, Z., & Li, Q. (2024). Water and potassium utilization efficiency and yield and quality of cucumber (Cucumis sativus L.). *Scientia Horticulturae*, *330*, 113025. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113025

Lynch, J. M. (1987). The Rhizosphere. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Maldonado, L. A., Pacheco, R. R., & Trejo, A. M. (2020). Plant growth-promoting bacteria isolated from arid soil improve the growth and nutrient uptake in lettuce and tomato. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 607355. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.607355

Mapelli, F., Marasco, R., Rolli, E., Barbato, M., Cherif, A., Guesmi, A., ... & Daffonchio, D. (2013). Potential for plant growth promotion of rhizobacteria associated with Salicornia growing in Tunisian hypersaline soils. BioMed Research International, 2013, 248078. https://doi.org/10.1155/2013/248078

Mendizabal-Reliz, A., Santillano-Cázares, M., Peña-Cabriales, J. J., & Gutiérrez-Miceli, F. A. (2023). Mobilization of phosphorus by Rhizobium sp. B02 and its effect on the growth of maize in reduced fertilization systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 125(3), 345–357. https://doi.org/10.1007/s10705-023-10268-y

Nautiyal, C. S. 1999. An efficient microbiological growth médium for screening phosphate solubilizing microorganisms. [en linea], http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x/epdf

Santiago-López, L., Aguilar-Toalá, J. E., Hernández-Mendoza, A., Vallejo-Cordoba, B., Liceaga, A. M., & González-Córdova, A. F. (2018). Invited review: Bioactive compounds produced during cheese ripening and health effects associated with aged cheese consumption. *Journal of dairy science*, *101*(5), 3742-3757. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13465

Schwyn B, Neilands JB (1987) Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal Biochem* 160:47–56. https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9

Naveed, M., Mitter, B., Yousaf, S., Pastar, M., & Sessitsch, A. (2014). The endophyte Leclercia adecarboxylata MO1 promotes plant growth and harbours ACC deaminase and other plant growth-promoting traits. *Journal of Applied Microbiology*, 116(2), 498–510. https://doi.org/10.1111/jam.12393

Ness, P. (2003). Salt tolerance in halophyte species: Mechanisms and genetic control. Journal of Arid Environments, 55(1), 61–76.

Pérez-García L. A.., Mata, J. S., Rodríguez, R. P., Puente, E. O. R., Rodríguez, J. A. T., & Rangel, P. P. (2025). Plant growth promoting rhizobacteria enhances germination and bioactive compound in cucumber seedlings under saline stress. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *12*(2), 4. https://doi.org/10.19136/era.a12n2.4276

Pinton, R., Varanini, Z., & Nannipieri, P. (2001). The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface. New York, NY: Marcel Dekker.

Pretty, J. (2008) A*gricultural sustainability: concepts, principles and evidence Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 447–465 http://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163

Raviv, M. (2015). The use of compost as a peat substitute for organic vegetable transplants: A review. Scientia Horticulturae, 199, 138–148. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.012

Rodríguez Lemus, M. C., López Muraira, I. G., & Gómez Rodríguez Lemus, M. C., López Muraira, I. G., & Gómez Leyva, J. F. (2021). Evaluación de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas de suelos salinos en el cultivo de jitomate (Solanum lycopersicum). *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*. http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/handle/123456789/374

Schmidt, R. The terminology and classification of steles: Historical perspective and the outlines of a system. *Bot. Rev* 48, 817–931 (1982). https://doi.org/10.1007/BF02860875

Singh, J. S., & Mukerji, K. G. (2006). Microbial Activity in the Rhizosphere. Berlin, Germany: Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-29420-1

Sultana, S., Alam, S., & Karim, M. M. (2021). Screening of siderophore-producing salt-tolerant rhizobacteria suitable for supporting plant growth in saline soils with iron limitation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4, 100150. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100150

Schwyn B, Neilands JB (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal Biochem* 160:47–56 https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9

Wahid, F., Sharif, M., Steffens, D., & Schubert, S. (2020). Phosphate solubilizing bacteria: Occurrence, mechanisms and their role in crop production. *Agriculture*, 10(8), 334. https://doi.org/10.3390/agriculture10080334

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/