

Efecto de inoculación con bacterias del género *Pseudomonas* sobre crecimiento de plantas de *Fraxinus uhdei*

Effect of inoculation with bacteria of the genus *Pseudomonas* on growth of *Fraxinus uhdei* plants

Ana Laura Cruzado-Vargas¹ , Liliana Sánchez-Montaño¹ , Sabina Jiménez-Lemus¹ , Roberto Lindig-Cisneros^{1*} 

¹Laboratorio de Restauración Ambiental, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, (IIES-UNAM). Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: rlindig@iies.unam.mx

Nota científica

Recibido: 05 de junio 2025

Aceptado: 12 de noviembre 2025

RESUMEN. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) mejoran el desarrollo de las plantas. Este estudio evaluó el efecto de consorcios bacterianos de *Pseudomonas* en plantas de *Fraxinus uhdei*. Se estableció un diseño experimental completamente aleatorio con dos tratamientos de semilla: semillas escarificadas (SE) y sin escarificar (SS); y tres tratamientos de inoculación: control, dosis única y dosis múltiple (cada 8 días). Se evaluaron crecimiento acumulado, biomasa (aérea, radical y total), nitrógeno, fósforo y relación N/P. Mediante un ANOVA con el software R, se encontraron diferencias significativas con el tratamiento de inoculación múltiple para todas las variables de respuesta. Por medio de regresiones segmentadas se identificó un punto de corte a los 68 días en el crecimiento acumulado, indicando el período óptimo de inoculación. Los resultados confirman que las BPCV son una estrategia viable para mejorar el crecimiento de plantas destinadas a la restauración de ecosistemas degradados.

Palabras clave: Consorcios bacterianos, interacción planta-microorganismo, promoción del crecimiento, restauración ecológica.

ABSTRACT. Plant growth-promoting bacteria (PGPB) improve plant development. In this study we evaluated the effect of *Pseudomonas* bacterial consortia on *Fraxinus uhdei* plants. A completely randomized experimental design was established with two seed treatments: scarified seeds (SE) and unscarified seeds (SS); and three inoculation treatments: control, single dose, and multiple doses (every 8 days). Accumulated growth, biomass (aerial, root, and total), nitrogen, phosphorus, and N/P ratio were evaluated. Using ANOVA with R software, significant differences were found with the multiple inoculation treatment for all response variables. Segmented regressions identified a cutoff point at 68 days in cumulative growth, indicating the optimal inoculation period. The results confirm that BPCVs are a viable strategy for improving the growth of plants intended for the restoration of degraded ecosystems.

Keywords: Bacterial consortia, plant-microorganism interaction, growth promotion, ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en México, al menos el 76% de los suelos presenta problemas de erosión (Bolaños-González *et al.* 2016), que se debe en gran medida a los cambios de uso de suelo por diversas actividades antrópicas. Sumado a lo anterior, los efectos del cambio climático están causando declinación de las masas forestales como consecuencia del estrés por sequía y plagas (Gallardo-Salazar *et al.* 2023). Ante esto, una manera de reducir los efectos de la degradación ambiental es mediante la restauración ecológica, un proceso que tiene como objetivo ayudar a recuperar un sistema que ha sido degradado debido a actividades humanas (SER 2004). Sin embargo, es necesario identificar especies nativas que puedan tolerar sequía y suelos degradados, así como su respuesta a la presencia de microorganismos del suelo. Una especie nativa de México con estas características en zonas templadas es *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh (fresno mexicano), perteneciente a la familia Oleaceae. Es un árbol de tamaño mediano a grande que puede alcanzar una altura de hasta 35 m (Rzedowski y Calderón-de-Rzedowski 2004). Se distribuye naturalmente en el oeste y sur de México, y al sur de Guatemala y Honduras, a altitudes entre los 1 100 y 2 600 m snm (Saavedra-Ramírez *et al.* 2018).

Fraxinus uhdei se encuentra en estado silvestre en diversos ecosistemas como bosque de galería, bosque mixto de pino-encino y bosque mesófilo de montaña, por lo que se considera que tiene gran importancia ecológica y económica (Villanueva-Díaz *et al.* 2015). Algunas características que lo hacen ideal para la restauración ecológica es que tiene efecto restaurador en terrenos degradados, ayudándolos a su recuperación, incluso en sitios donde hubo explotación minera, debido a la capacidad de su sistema radicular para persistir en una amplia variedad de suelos y condiciones ambientales (Ambriz *et al.* 2010, Ramírez-Mandujano *et al.* 2017). Por otro lado, una estrategia alternativa, económica, a largo plazo y sostenible para la conservación y la restauración del suelo es el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) (Racioppo *et al.* 2023). Las BPCV benefician el crecimiento y desarrollo de las plantas, su efecto positivo se ha vinculado tradicionalmente con su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, y para sintetizar hormonas vegetales, como el ácido indolacético y las giberelinas (Pardo-Díaz 2021). Sin embargo, estudios recientes han mostrado que estos microorganismos también desempeñan un papel clave en la protección y reducción de los efectos de condiciones de estrés como sequía, salinidad del suelo (Mishra *et al.* 2021) y la presencia de metales pesados (Pardo-Díaz 2021).

Las BPCV favorecen el crecimiento de las plantas tanto de manera directa como indirecta. La acción directa incluye la producción de fitohormonas, la solubilización de fosfatos, micronutrientes y la fijación biológica de nitrógeno. En cuanto a los efectos indirectos, estos se deben a la modificación del entorno rizosférico y su ecología, desempeñando un papel como agentes supresores de fitopatógenos (González y Fuentes 2017). Entre las BPCV más utilizadas se encuentran especies del género *Pseudomonas*. Estas bacterias tienen una gran versatilidad metabólica y plasticidad genética, ya que habitan en diferentes ecosistemas tanto terrestres como acuáticos (Sánchez y Guerra 2022). Diversas especies del género *Pseudomonas* son importantes en la dinámica de la interacción suelo-planta por su abundancia en suelos de manera natural, especialmente en la rizosfera, su rápido crecimiento, su capacidad para estimular directamente el crecimiento de las plantas y su habilidad

para controlar enfermedades a través de varios mecanismos (Höfte y Altier 2010, Kumar *et al.* 2017). De las rizobacterias, el género *Pseudomonas* es el más explorado debido a su importancia biológica y medicinal (Kankariya *et al.* 2019). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la inoculación con un consorcio bacteriano formado por especies del género *Pseudomonas* sobre el crecimiento de plantas de *Fraxinus uhdei* provenientes de semillas escarificadas y sin escarificar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Producción de plantas

Se colectaron semillas de fresno mexicano (*Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh) en junio de 2024, en las inmediaciones del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), UNAM, Campus Morelia. Las semillas fueron divididas en 10 lotes de 100 g cada uno, cinco lotes que fueron asignados al azar para ser sembrados sin escarificar (SS); y los cinco lotes restantes fueron escarificados mecánicamente en un molino manual (SE). Para determinar si esta práctica facilita la germinación de las semillas. Durante la tercera semana de junio de 2024 se pusieron a germinar las semillas en almácigos de 60 x 40 x 7 cm con sustrato esterilizado compuesto por suelo de la localidad, agrolita, vermiculita y peat moss (volumen 70:10:10:10). Las plantas se germinaron a temperatura ambiente con luz natural y se realizó riego para mantener el suelo permanentemente húmedo. La germinación comenzó a las dos semanas de forma diferenciada por tratamiento de semilla.

Para el trasplante de las plantas recién germinadas de fresno, tanto de SS y SE, se utilizó suelo obtenido en el ejido de Coro Grande, Michoacán (19° 75' LN y 101° 40' LO), que corresponde al tipo luvisol. El cual fue esterilizado a 120 °C en autoclave por una hora. Una vez frío el sustrato, se procedió a llenar tubetes de 130 cm³. Se trasplantó una planta de fresno por tubete a los nueve días de iniciada la germinación en almácigo porque para esa fecha se contaba con suficientes plantas para establecer el experimento, que contó con 144 plantas de SS y 143 de SE.

Aislamiento de cepas bacterianas, identificación y producción de inóculo

Las cepas bacterianas fueron aisladas de muestras de suelo obtenidas en el municipio de Tlalpujahua, que se encuentra en el noroeste del estado de Michoacán, México, en un sitio de restauración ecológica, siguiendo el procedimiento de Rojas-Solis *et al.* (2023). Para la extracción de ADN bacteriano de las cepas aisladas, seguimos el procedimiento de extracción de Mahuku (2004), posteriormente se realizó PRC (reacción en cadena de la polimerasa) para amplificar el fragmento de ADN extraído, a través de los primers bacterianos universales fD1: 5'-CAGAGTTGATCCTGGCTCAG-3' y rD1: 5'-AAGGAGGTGATCCAGCC-3' siguiendo la técnica de Hernández-León *et al.* (2015). Las amplificaciones por PCR se hicieron con un mini termociclador Techne TC-32 (Keison Products, Chelmsford, Inglaterra) en tubos de Go Taq Master Mix (Promega, Madison, WI, Estados Unidos), realizando 30 ciclos de 30s a 94°C, 30 s a 55°C, 40 s a 72°C, y finalizando con 10 min a 72°C. Finalmente, el fragmento de 16S rDNA de ~1 500 pares de bases fue confirmado en un gel de agarosa al 1%. El gel se colocó en la cámara de electroforesis a 110 voltios y 400 mA durante 20 minutos, y se utilizó una lámpara de luz UV para visualizar las bandas de ADN extraídas.

Las muestras de ADN amplificadas en la etapa anterior fueron enviadas a Macrogen, una empresa especializada en la purificación y secuenciación de genomas (<https://dna.macrogen.com>), para purificar y secuenciar las muestras de 16S rDNA de las cepas en duplicado. Las secuencias resultantes fueron identificadas utilizando la base de datos del "National Center for Biotechnology Information" (NCBI) a través de la Herramienta "Basic Local Alignment Search Tool" (BLAST). Cada secuencia se alineó con secuencias similares para cada cepa en la base de datos. Las cepas 12.5 PP955405.1 y 32.5 PP955411.1 del GenBank, que corresponden al género *Pseudomonas* se utilizaron para el presente ensayo.

Ambas cepas se sembraron en cajas de Petri con agar nutritivo (BD Bioxon) de manera independiente, y se dejaron crecer durante 48 h a 30 °C en incubadora Lumistell (HEC-41). Pasado el tiempo de crecimiento, a cada caja Petri se agregaron 10 mL de agua destilada estéril para poder remover cada colonia y pasarla a matraces con 200 mL de caldo nutritivo (BD Bioxon), dejando crecer por 48 h más en un agitador DLAB (SK-O330-Pro) a 150 rpm. Posteriormente, en una centrifugadora Thermo Scientific (Centra CL-2), se realizó una centrifugación a 3 000 rpm por seis minutos en tubos de ensayo, conservando solo el pellet bacteriano, para después hacer una resuspensión con agua destilada estéril. La concentración bacteriana resultante se midió a una densidad óptica de 590 nm con un espectrofotómetro UV - VIS Thermo Fisher Scientific Genesys 20 (4001/4), manteniendo el rango de absorbancia entre 0.9 - 1.1 (aproximadamente 1×10^6 UFC/mL). Finalmente se mezclaron las dos cepas en proporción 1:1.

Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental completamente aleatorio con dos factores y sus respectivos niveles. El primero factor fue el tratamiento pregerminativo de las semillas, con dos niveles: semillas escarificadas (SE) y semillas sin escarificar (SS). El segundo factor fue la inoculación con el consorcio bacteriano de *Pseudomonas* con tres niveles: dosis múltiple (M: aplicación de 2 mL/planta cada ocho días), dosis única (U: aplicación de 2 mL planta⁻¹ al inicio del experimento) y control (C: sin inoculación). Todas las combinaciones de los niveles de ambos factores fueron evaluadas, resultando en un total de seis tratamientos experimentales (SE-M; SE-U; SE-C; SS-M; SS-U; SS-C). La inoculación se comenzó la segunda semana de agosto de 2024, a los dos meses de edad de las plantas, y la última inoculación fue la primera semana de noviembre de 2024.

Medición de las plantas

Para evaluar el efecto de la inoculación entre tratamientos, se midió la altura de cada planta, desde la base hasta la yema principal con una regla graduada en milímetros, cada 15 días durante el período de inoculación (13 semanas). Posteriormente a la última inoculación, se continuó midiendo por 13 semanas más, para determinar el efecto de legado de los tratamientos. El crecimiento acumulado se obtuvo de la diferencia de la medición final y la medición inicial en altura de planta. A las 13 semanas de la primera inoculación, se seleccionaron 10 plantas (repeticiones) al azar por tratamiento (60 plantas en total), se cosecharon y cada planta fue puesta en bolsas de papel para proceder a secar a 70 °C por 48 h en un horno de secado con operación de convección por gravedad BG (H-62). Se pesó la biomasa aérea, de raíz y total en seco por planta en una balanza analítica Sartorius (SECURA 124-1S) con precisión de 0.1 mg.

Análisis de Nitrógeno y Fósforo totales (N_t y P_t)

Para el análisis de nitrógeno y fósforo las plantas secas (parte aérea y raíces) se maceraron en un molino de laboratorio (Thomas Wiley 3383-L10). Para poder obtener al menos 1 g de muestra para digestión por el método de Kjeldahl (Bremmer 1996), se mezclaron dos plantas por tratamiento al azar. Una vez terminado este proceso se determinó el contenido de N_t a través de un analizador elemental (modelo XY-2 Sampler), y el P_t se cuantificó con una técnica colorimétrica (método no. G-189-97 Rev. 3 multi-test MT7/MT8). Además, se calculó la relación N/P de cada muestra. El Nitrógeno y Fósforo totales (N_t y P_t, respectivamente) se obtuvieron en el Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos (IIES-UNAM).

Análisis estadístico

Las variables evaluadas fueron crecimiento acumulado, biomasa aérea, biomasa de raíz, biomasa total, N_t, P_t y la relación N/P entre el tratamiento de semillas (SS y SE) y los tratamientos de inoculación (M, U o C). Se realizaron análisis de varianza de múltiples factores, y comparación de medias con la prueba de Tukey con el software R (R Core Team 2022). Además, se obtuvo la media del crecimiento acumulado final de cada uno de los seis tratamientos (SE-M; SE-U; SE-C; SS-M; SS-U; SS-C), y se calcularon los días acumulados de crecimiento. Con estos datos se estimó el diferencial con respecto al tiempo del crecimiento acumulado, para medir el cambio absoluto en el crecimiento a través del tiempo. Se realizaron regresiones lineales simples y regresiones segmentadas tomando como variable dependiente cada uno de los seis tratamientos y como variable independiente los “días acumulados”. El mejor modelo fue seleccionado con el criterio de información de Akaike (AIC) y el mínimo $\Delta AIC > 2$ (De-Paz *et al.* 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En términos del desarrollo de las plantas, las medias para todas las variables evaluadas fueron mayores en el tratamiento de inoculación múltiple que en el de inoculación única o el control. Los resultados del análisis de varianza para el crecimiento acumulado (altura final - altura inicial) indican que hubo diferencias significativas para el factor de inoculación ($F(2, 220) = 31.9, P = 6.67 \times 10^{-13}$), no así para el factor de escarificación ($F(2, 220) = 2.28, P = 0.1321$), ni para la interacción entre ambos factores ($F(2, 220) = 0.145, P = 0.86$) (Tabla 1). Los tratamientos de inoculación que resultaron ser diferentes de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), fue el tratamiento de dosis múltiple, tanto para SS como SE, comparado con los otros tratamientos que no difieren entre sí. Al analizar el patrón de crecimiento de las plantas en función del tiempo, se detectó que alrededor de los 68 días se presenta un punto de inflexión en la curva de crecimiento para todos los tratamientos (Figura 1).

En cuanto a la biomasa, el efecto de los tratamientos por inoculación resultó ser significativo tanto para biomasa aérea ($F(2, 24) = 17.21, P = 0.00002$), para la biomasa de raíz ($F(2, 24) = 3.58, P = 0.0435$) y para biomasa total ($F(2, 24) = 10.41, P = 0.0005$) (Tabla 1). Al igual que en las variables evaluadas anteriores, no se encontraron diferencias significativas para el factor de escarificación, ni para la interacción entre los factores (Figura 2A).

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA) para las variables de respuesta en crecimiento acumulado, biomasa, nitrógeno total, fósforo total y relación N/P en plantas de *Fraxinus uhdei* sometidas a tratamientos de semillas y de inoculación con consorcio bacteriano de *Pseudomonas*.

| Fuente de variación | S.C. | G.L. | F | P | Fuente de variación | S.C. | G.L. | F | P |
|--|-------|------|------|---------|--|--------|------|------|---------|
| Crecimiento acumulado en altura | | | | | Nitrógeno total (N_t) | | | | |
| Inoculación | 262.4 | 2 | 31.9 | < 0.001 | Inoculación | 3661.5 | 2 | 10.4 | < 0.001 |
| Escarificación | 9.4 | 1 | 2.3 | 0.132 | Escarificación | 622.5 | 1 | 3.6 | 0.072 |
| interacción | 1.2 | 2 | 0.1 | 0.865 | interacción | 170.9 | 2 | 0.5 | 0.620 |
| Residuales | 903.8 | 220 | | | Residuales | 4204.2 | 24 | | |
| Biomasa aérea | | | | | Fósforo total (P_t) | | | | |
| Inoculación | 0.9 | 2 | 17.2 | < 0.001 | Inoculación | 7.3 | 2 | 8.8 | 0.001 |
| Escarificación | 0.01 | 1 | 0.2 | 0.620 | Escarificación | 1.0 | 1 | 2.4 | 0.136 |
| interacción | 0.02 | 2 | 0.3 | 0.735 | interacción | 0.2 | 2 | 0.3 | 0.764 |
| Residuales | 0.62 | 24 | | | Residuales | 9.9 | 24 | | |
| Biomasa de raíz | | | | | Relación N/P | | | | |
| Inoculación | 0.2 | 2 | 3.6 | 0.044 | Inoculación | 38.1 | 2 | 3.7 | 0.040 |
| Escarificación | 0.01 | 1 | 0.4 | 0.559 | Escarificación | 7.2 | 1 | 1.4 | 0.250 |
| interacción | 0.01 | 2 | 0.2 | 0.799 | interacción | 3.5 | 2 | 0.3 | 0.713 |
| Residuales | 0.6 | 24 | | | Residuales | 124.2 | 24 | | |
| Biomasa total | | | | | | | | | |
| Inoculación | 1.8 | 2 | 10.4 | < 0.001 | | | | | |
| Escarificación | 0.03 | 1 | 0.3 | 0.568 | | | | | |
| interacción | 0.03 | 2 | 0.2 | 0.850 | | | | | |
| Residuales | 2.1 | 24 | | | | | | | |

En cuanto a la concentración de nitrógeno y fósforo en el tejido de las plantas, el factor de inoculación fue estadísticamente significativo para el N_t (F (2, 24) = 3.58, P = 0.0005), y para el P_t (F (2, 24) = 8.82, P = 0.0013). La relación N/P presentó diferencias significativas en respuesta a la inoculación (F (2, 24) = 3.68, P = 0.0404) (Tabla 1). Sin embargo, ni para el factor de escarificación ni para la interacción entre factores se presentaron diferencias significativas. A través de una prueba de Tukey (P ≤ 0.05), se determinó que el tratamiento que es diferente al resto de los tratamientos es la inoculación múltiple para N_t y P_t (Figura 2B y 2C). Mientras que en la relación N/P el tratamiento de inoculación múltiple es diferente al control, pero no al de inoculación única (Figura 2D).

Para identificar el punto de inflexión en las curvas de crecimiento acumulado, se calculó el diferencial con respecto al tiempo de esta variable y se comparó un ajuste de regresión simple con un ajuste de regresión segmentada utilizando el criterio de información de Akaike (Figura 3). Para todas las combinaciones de tratamientos, la regresión lineal simple de cada uno de ellos arroja un valor de R² bajo (<0.60), y solo fue significativo para los tratamientos SS-M y SE-M. Mientras que con la regresión lineal segmentada se identificaron dos secciones con un punto de corte cercano a los 68 días de crecimiento acumulado, en donde las R² fueron altas (>0.95) y significativas para todas las combinaciones de tratamientos (Tabla 2).

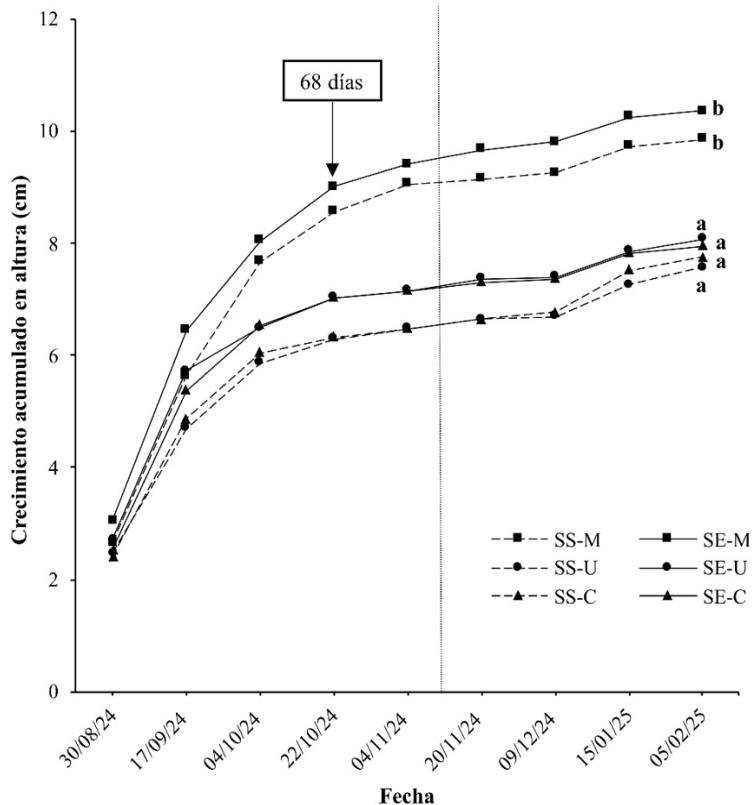


Figura 1. Crecimiento acumulado en altura de plantas de *Fraxinus uhdei* con distintos tratamientos de inoculación con consorcios bacterianos de *Pseudomonas* sp., y dos tratamientos de semilla. Letras distintas indican diferencia significativa entre procedencias de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Línea punteada vertical representa la fecha de última inoculación.

Los resultados indican que el tratamiento de inoculación con dosis múltiple es efectivo para estimular el crecimiento de las plantas de *Fraxinus uhdei*. Esta especie arbórea responde en términos de crecimiento y acumulación de biomasa a la inoculación con hongos micorrízicos (Báez-Pérez *et al.* 2015). Este tipo de efectos de estimulación del crecimiento depende de la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la interacción con los microorganismos del suelo, como muestra el estudio de Egamberdiyeva (2007) quien inoculó plantas de maíz (*Zea mays*) con *Pseudomonas alcaligenes* PsA15, *Bacillus polymyxa* BcP26 y *Mycobacterium phlei* MbP18 en dos tipos de suelo. Por su parte Liu *et al.* (2013) encontraron que los efectos beneficiosos de la inoculación con *Bacillus subtilis* en plántulas de *Fraxinus americana* ocurren independientemente de la concentración de nutrientes en el suelo, lo que sugiere la importancia de las bacterias promotoras del crecimiento para el desarrollo de las plantas de este género. Entre los hallazgos destaca que los exudados radiculares aumentaron significativamente debido a la inoculación.

Además, los resultados de biomasa que resultaron ser significativos de acuerdo al tratamiento de inoculación, coinciden con los resultados de Fernandes-dos-Santos *et al.* (2018), que inocularon plantas de *Pinus taeda* con *Azospirillum brasiliense*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*. También coinciden con los resultados de Cuevas-Cruz *et al.* (2025), quienes inocularon *Fraxinus uhdei* con

Azospirillum brasiliense, y los de Solórzano-Acosta y Quispe (2024), para la acumulación de biomasa en *Persea americana* inoculada con *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas plecoglossicida*. En cuanto a la acumulación de nitrógeno y fósforo en los tejidos de las plantas de *F. uhdei*, los resultados obtenidos coinciden con los de Cuevas-Cruz *et al.* (2025) con esta misma especie, y con otros como los de Sánchez-López *et al.* (2018) con especies del género *Pseudomonas* y tomate (*Solanum lycopersicum*) y el de Fernandes *et al.* (2023) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) inoculadas con *Azospirillum brasiliense*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*.

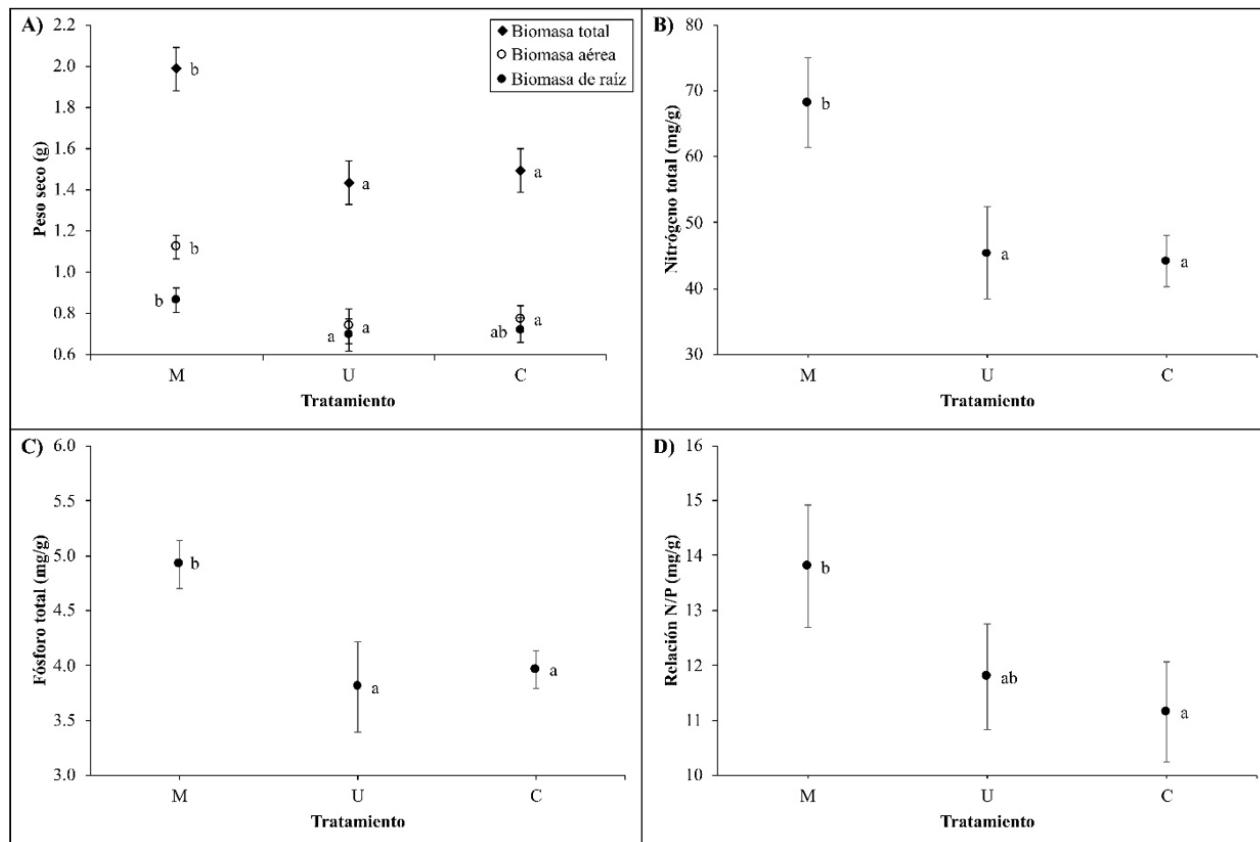


Figura 2. Respuesta de plantas de *Fraxinus uhdei* usando el promedio de los tratamientos de inoculación (M: dosis múltiple; U: dosis única y C: control o sin inoculación), los paneles corresponden a las siguientes variables: A) Peso seco de biomasa aérea, de raíz y biomasa total, B) Nitrógeno total, C) Fósforo total y D) Relación N/P.

Considerando que cepas del género *Pseudomonas* que promueven el crecimiento vegetal han sido aisladas de suelos contaminados con metales pesados (Rojas-Solís *et al.* 2025), los resultados confirman que las BPCV son una estrategia viable para mejorar el crecimiento de plantas destinadas a la restauración de ecosistemas degradados.

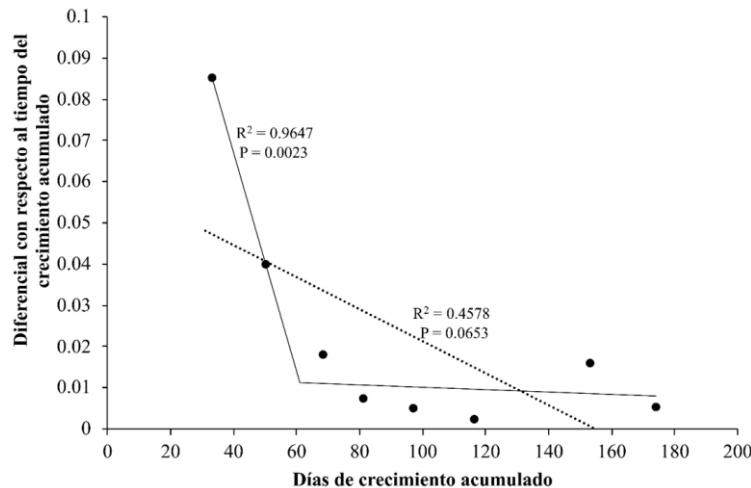


Figura 3. Gráfico de regresión lineal simple y segmentada del promedio del crecimiento acumulado de los seis tratamientos.

Tabla 2. Resultados de regresión lineal simple y regresión lineal segmentada (por tratamiento) del diferencial con respecto al tiempo del crecimiento acumulado con días acumulados con sus respectivos AIC ($\Delta\text{AIC}>2$), R^2 y valor P de R^2 .

| Tratamiento | Modelo de regresión | | <i>P</i> | AIC | ΔAIC | R^2 | <i>P</i> |
|-------------|---------------------|----------|----------|--------|--------------------|--------|----------|
| SS-M | Simple | | 0.0271 | -34.38 | | 0.5844 | 0.0271 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0009 | -47.78 | 13.40 | 0.9528 | 0.0041 |
| SS-U | Simple | | 0.1052 | -37.07 | | 0.3773 | 0.1052 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0011 | -53.76 | 16.69 | 0.9531 | 0.0040 |
| SS-C | Simple | | 0.1427 | -34.72 | | 0.3215 | 0.1427 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0014 | -51.67 | 16.85 | 0.9506 | 0.0045 |
| SE-M | Simple | | 0.0331 | -33.06 | | 0.5583 | 0.0331 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0007 | -49.38 | 16.32 | 0.9652 | 0.0022 |
| SE-U | Simple | | 0.1161 | -32.32 | | 0.3596 | 0.1161 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0008 | -53.07 | 20.75 | 0.9710 | 0.0015 |
| SE-C | Simple | | 0.0764 | -33.69 | | 0.4323 | 0.0764 |
| | Segmentada | <68 días | 0.0005 | -53.59 | 19.9 | 0.9714 | 0.0015 |
| | | | | | | | |

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la DGAPA de la UNAM por la beca posdoctoral otorgada a ALCV. Agradecemos a Rodrigo Velazquez-Durán por su asistencia para el análisis de contenido de carbono en muestras de tejido vegetal.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Ambriz E, Báez-Pérez A, Sánchez-Yáñez JM, Moutoglís P, Villegas J (2010) *Fraxinus–Glomus–Pisolithus* symbiosis: Plant growth and soil aggregation effects. *Pedobiologia* 53(6): 369-373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2010.07.001>
- Báez-Pérez AL, Gómez-Romero M, Villegas J, Barrera EDI, Carreto-Montoya L, Lindig-Cisneros R (2015) Inoculación con hongos micorrízicos y fertilización con urea de plantas de *Fraxinus uhdei* en acrisoles provenientes de sitios degradados. *Botanical Sciences* 93(3): 501-508. <https://doi.org/10.17129/botsci.207>
- Bolaños-González MA, Paz-Pellat F, Cruz-Gaistardo CO, Argumedo Espinoza JA, Romero Benítez VM, De la Cruz Cabrera JC (2016) Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34(3): 271-288.
- Bremmer JM (1996) Nitrogen-total. In: Methods of soil analysis, part 3. Soil Science Society of America Book Series. USA. pp. 1085-1121.
- Cuevas-Cruz JC, Martínez-Trinidad T, Pérez-Moreno J, Carcaño-Montiel GM, López-López MA y Gómez-Guerrero A (2025) Crecimiento, vitalidad y nutrición de plántulas de *Fraxinus uhdei* (Oleaceae) con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Acta Botanica Mexicana* 132: e2475. <https://doi.org/10.21829/abm132.2025.2475>
- De-Paz M, Gobbi M, Raffaele E (2019) Revisión de las experiencias de revegetación con fines de restauración en bosques de la Argentina. *Ecología Austral* 29(2): 194-207. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.2.0.689>
- Egamberdiyeva D (2007) The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied Soil Ecology* 3(2-3): 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.005>
- Fancis JK (1990) *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh. Fresno, tropical ash. SO-ITF-SM-28. United States Department of Agriculture, Southern Forest Experiment Station Institute of Tropical Forestry, San Juan, Puerto Rico. 4p.
- Fernandes-dos-Santos R, Cruz S, Botelho G, Flôres A (2018) Inoculation of *Pinus taeda* seedlings with plant growth-promoting rhizobacteria. *Floresta E Ambiente* 25(1): e20160056. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.005616>
- Fernandes GC, Rosa PAL, Jalal A, Oliveira CEdS, Galindo FS, Viana RdS, De Carvalho PHG. Silva ECd, Nogueira TAR, Al-Askar AA, Hashem AH, AbdElgawad H, Teixeira-Filho M CM (2023) Technological quality of sugarcane inoculated with plant-growth-promoting bacteria and residual effect of phosphorus rates. *Plants* 12: 2699. <https://doi.org/10.3390/plants12142699>
- Gallardo-Salazar JL, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros R, López-Toledo L, Blanco-García A, Endara-Agramont AR (2023) Three decades of remote sensing analysis on forest decline related to climate change: a bibliometric study. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 49: 69-87. <http://doi.org/10.18172/cig.5639>
- González H, Fuentes MN (2017) Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista Ciencias Agrícolas* 34(1): 17-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.22267/rcia.173401.61>
- Hernández-León R, Rojas-Solís D, Contreras-Pérez M, Orozco-Mosqueda MC, Macías-Rodríguez LI, Reyes-de la Cruz H, Valencia-Cantero E, Santoyo G (2015) Characterization of the antifungal and plant

- growth-promoting effects of diffusible and volatile organic compounds produced by *Pseudomonas fluorescens* strains. *Biological Control* 81: 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.11.011>
- Höfte M, Altier N (2010) Fluorescent pseudomonads as biocontrol agents for sustainable agricultural systems. *Research in Microbiology* 161(6): 464-471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resmic.2010.04.007>
- Kankariya RA, Chaudhari AB, Gavit PM, Dandi ND (2019) 2,4-Diacetylphloroglucinol: A novel biotech bioactive compound for agriculture. In: Singh D, Gupta V, Prabha R (eds) *Microbial interventions in agriculture and environment*. Springer, Singapore. pp: 419-452. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8391-5_16
- Kumar A, Verma H, Singh VK, Singh PP, Singh SK, Ansari WA, Yadav A, Singh PK, Pandey KD (2017) Role of *Pseudomonas* sp. in sustainable agriculture and disease management. In: Meena V, Mishra P, Bisht J, Pattanayak A (eds) *Agriculturally important microbes for sustainable agriculture*. Springer, Singapore. pp: 195-215. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5343-6_7
- Liu F, Xing S, Ma H, Du Z, Ma B (2013) Plant growth-promoting rhizobacteria affect the growth and nutrient uptake of *Fraxinus americana* container seedlings. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97: 4617-4625. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4255-1>
- Mahuku GS (2004) A simple extraction method suitable for PCR-based analysis of plant, fungal, and bacterial DNA. *Plant Molecular Biology Reporter*, 22(1), 71-81. <https://doi.org/10.1007/BF02773351>
- Mishra P, Mishra J, Arora NK (2021) Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants – Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research* 252: 126861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861>
- Pardo-Díaz S (2021) Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. In: Bonilla-Buitrago R, González-de-Bashan LE, Pedraza RO (ed) *Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma, y perspectivas*. 1.^a ed. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia. pp: 48-77.
- Racioppo A, d'Amelio A, De-Santis A, Bevilacqua A, Corbo MR, Sinigaglia M (2023) Potential use of plant growth-promoting bacteria to enhance growth and soil fertility in marginal areas: Focus on the Apulia Region, Italy. *Agronomy* 13(12): 2983. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122983>
- Ramírez-Mandujano CA, Granados-García ME, Menor-Zeferino JC, Ibarra-Concepción E (2017) Control genético de crecimiento en vivero de colectas urbanas de *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsheim. *Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo* 19(1): 22-27.
- Rojas-Solis D, Rodríguez YMG, Larsen J, Santoyo G, Lindig-Cisneros R (2025) Growth Promotion of Maize Exposed to Arsenic and Mercury with a Consortia of Rhizosphere Bacteria Isolated from Mining Tailings. *Current Microbiology* 82: 438. <https://doi.org/10.1007/s00284-025-04393-w>
- Rojas-Solis D, Larsen J, Lindig-Cisneros R (2023) Arsenic and mercury tolerant rhizobacteria that can improve phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *PeerJ* 11:e14697 DOI 10.7717/peerj.14697
- Rzedowski J, Calderón-de-Rzedowski G (2004) Familia Oleaceae. Instituto de Ecología A.C. Centro Regional del Bajío. *Fasciculo 124*: 18-24.
- R Core Team. (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 4.2.2 (2022-10-31 ucrt)) [Computer software]. <https://www.r-project.org>. Fecha de consulta: 11 de noviembre 2025
- Saavedra-Ramírez KA, Etter A, Ramírez A (2018) Tropical ash (*Fraxinus uhdei*) invading Andean Forest remnants in Northern South America. *Ecological Processes* 7: 16. <https://doi.org/10.1186/s13717-018-0131-y>
- Sánchez CR, Guerra RP (2022) *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(4): 715-725. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2799>

Sánchez-López DB, Gómez-Vargas RM, Garrido-Rubiano MF, Bonilla-Buitrago RR (2018) Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3(7): 1401–1415. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1346>

SER (2004) Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration & Tucson: Society for Ecological Restoration International. www.ser.org. Fecha de consulta: 8 de octubre 2025.

Solórzano-Acosta RA, Quispe KR (2024) Assessing the role of field isolated *Pseudomonas* and *Bacillus* as growth-promoting rizobacteria on avocado (*Persea americana*) seedlings. Journal of Sustainable Agriculture and Environment 3: e12114. <https://doi.org/10.1002/sae2.12114>

Villanueva-Díaz J, Pérez-Evangelista ER, Beramendi-Orozco L, Cerano-Paredes J (2015) Crecimiento radial anual del fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.) en dos parques de la Comarca Lagunera. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(31): 40-57.