

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



RIZOBACTERIAS NATIVAS DE COAHUILA COMO ENRAIZADORES Y  
MEJORADORES DE LA CALIDAD DE FRUTOS DE HIGO (*Ficus carica* L.)

**Tesis**

Que presenta YONI GUDIEL GABRIEL MORALES  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

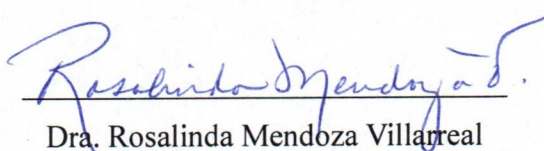
Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

RIZOBACTERIAS NATIVAS DE COAHUILA COMO ENRAIZADORES Y  
MEJORADORES DE LA CALIDAD DE FRUTOS DE HIGO (*Ficus carica* L.)

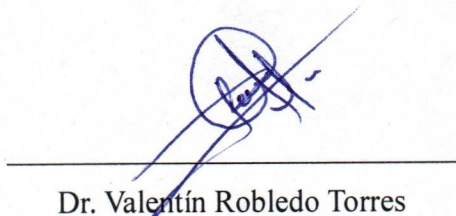
Tesis

Elaborada por YONI GUDIEL GABRIEL MORALES como requisito parcial para  
obtener el grado de Maestro En Ciencias En Horticultura con la supervisión y la  
aprobación del Comité de Asesoría



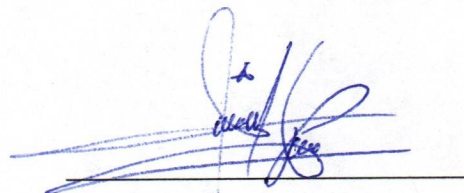
Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal

Director de Tesis



Dr. Valentín Robledo Torres

Asesor



Dr. Armando Hernández Pérez

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi más sincero agradecimiento al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)**, cuyo valioso respaldo fue determinante para la realización de mis estudios de posgrado. El apoyo brindado no solo hizo posible mi formación académica, sino que también me permitió concentrarme plenamente en el desarrollo de esta investigación.

De igual manera, expreso mi profunda gratitud a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, institución que me acogió durante esta etapa de formación y que, a través de sus recursos, instalaciones y ambiente académico, facilitó de manera significativa mi crecimiento profesional y personal. El acceso a laboratorios y espacios de investigación fueron elementos clave que contribuyeron a la consolidación de este trabajo de maestría.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la **Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal**, mi asesora de tesis, por su invaluable orientación, paciencia y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia, compromiso y disposición para compartir sus conocimientos fueron fundamentales para enriquecer mi formación académica y profesional.

## DEDICATORIAS

A mi **familia**, por ser la base y el motor de cada uno de mis logros, por inculcarme el valor del esfuerzo, la disciplina y la perseverancia y por brindarme siempre su apoyo incondicional en cada paso de mi vida académica y personal. A mis hermanos, por su compañía, ánimo y palabras de alientos en los momentos de mayor desafío y de manera especial, a todos mis seres queridos que con su cariño y confianza me dieron la motivación necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi formación.

A mis **amigos**, quienes me acompañaron y apoyaron incondicionalmente a lo largo de este proceso académico, mi sincero reconocimiento. Del mismo modo, agradezco a mis **maestros** por su dedicación, por compartir generosamente su conocimiento y sabiduría, elementos clave en mi trayectoria.

# ÍNDICE GENERAL

## Contenido

<b>DEDICATORIAS</b> .....	iv
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN .....	3
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Agricultura sostenible y manejo ecológico de cultivos.....	5
Impacto del cambio climático en la agricultura .....	6
Estrés abiótico y su efecto en el desarrollo vegetal.....	6
Microbioma del suelo y su relación con la salud de las plantas .....	7
Rizósfera: estructura, función e interacción planta-microorganismo .....	8
Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR).....	9
Producción de fitohormonas por PGPR (ácido indol-3-acético, IAA).....	10
Solubilización de fósforo por microorganismos del suelo .....	11
Fijación biológica de nitrógeno por bacterias asociadas a plantas.....	12
Género <i>Pseudomonas</i> : características, ecología y beneficios agronómicos .....	13
Interacción planta- <i>Pseudomonas</i> .....	14
Producción de metabolitos secundarios por <i>Pseudomonas</i> .....	15
Uso de bioinoculantes microbianos en la agricultura moderna .....	16
Importancia económica y social del cultivo del higo ( <i>Ficus carica</i> L.).....	17
Valor nutricional y propiedades funcionales del higo .....	18
Demanda internacional del higo y oportunidades para México.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
Determinación de antocianinas .....	22
Determinación de fósforo.....	24
Concentración bacteriana.....	24
Determinación de nitrógeno.....	25

Análisis estadístico .....	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS.....	39

## LISTA DE CUADROS

<b>1. Tratamientos evaluados.....</b>	<b>22</b>
---------------------------------------	-----------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de frutos.....	27
Figura 2. Peso de fruto (g). .....	28
Figura 3. Diámetro ecuatorial (mm). .....	29
Figura 4. Diámetro polar (mm). .....	30
Figura 5. Sólidos solubles totales.....	31
Figura 6. Antocianinas. ....	32
Figura 7. Rendimiento. ....	33
Figura 8. Porcentaje de nitrógeno por (g) de muestra.....	34
Figura 9. Fósforo.....	35
Figura 10. Unidades formadoras de colonias.....	36
Figura 11. Longitud de raíz.....	37

## **RESUMEN**

**RIZOBACTERIAS NATIVAS DE COAHUILA COMO ENRAIZADORES Y  
MEJORADORES DE LA CALIDAD DE FRUTOS DE HIGO**

Por

**YONI GUDIEL GABRIEL MORALES  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DRA. ROSALINDA MENDOZA VILLARREAL -ASESOR-**

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

## RESUMEN

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal han demostrado ser una alternativa sostenible para mejorar el establecimiento y producción agrícola. Algo importante en particular para la propagación y producción de higuera (*Ficus carica* L.), un cultivo que destaca por el alto valor nutricional, contenido de fibra y compuestos bioactivos de su fruto. Este estudio evaluó el efecto de *Pseudomonas* sp. y un enraizador comercial sobre variables productivas y bioquímicas de higuera, variedad Black Mission, en invernadero. Antes del trasplante de varetas de higuera se aplicó ( $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>) de *Pseudomonas* sp., enraizador comercial (Radix), la combinación de ambos, y un control; el manejo del cultivo se realizó en bolsas de polietileno, aumentando su volumen de tres hasta 30 L. Posteriormente cada mes se aplicó *Pseudomonas* sp. en la misma dosis en las plantas tratadas previamente con dicha rizobacteria. Con la combinación de *Pseudomonas* sp. y Radix hubo una mayor concentración bacteriana en la rizosfera (61.4%), se incrementó número de frutos (5.2%), rendimiento (67.8%), y concentración de fósforo en hojas respecto al control. La aplicación individual de *Pseudomonas* sp. aumentó peso de fruto (13.4%), diámetro polar (7.9%) y ecuatorial (6.4%), y sólidos solubles (3.9%), respecto al control. Sin embargo, los mayores niveles en antocianinas los presentó el control respecto a los demás tratamientos (30.7%). *Pseudomonas* sp., sola o en combinación con el enraizador Radix, constituye una opción sostenible para mejorar la producción y la calidad del higo.

**Palabras clave:** bioestimulantes, rizobacterias, higuera, raíces.

**ABSTRACT**

**NATIVE RHIZOBACTERIA FROM COAHUILA AS ROOTING AGENTS AND FRUIT QUALITY  
ENHANCERS IN FIG**

By

**YONI GUDIEL GABRIEL MORALES  
MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DRA. ROSALINDA MENDOZA VILLARREAL -ASESOR-**

## ABSTRACT

Plant growth-promoting rhizobacteria represent a sustainable alternative to optimize crop establishment and productivity. This is particularly relevant for the propagation and production of fig (*Ficus carica* L.), a crop valued for its high nutritional content, dietary fiber, and bioactive compounds. This study evaluated, under greenhouse conditions, the effect of *Pseudomonas* sp. and a commercial rooting agent (Radix) on productive and biochemical variables of the Black Mission variety. Before transplanting the fig cuttings, the following treatments were applied: *Pseudomonas* sp. ( $1 \times 10^8$  CFU ml<sup>-1</sup>), Radix, their combination, and a control. The crop was managed in polyethylene bags, gradually increasing substrate volume from 3 to 30 L. In plants previously treated with the rhizobacterium, monthly applications of *Pseudomonas* sp. were repeated at the same dose.

The combination of *Pseudomonas* sp. and Radix promoted the highest bacterial concentration in the rhizosphere (61.4%) and increased fruit number (5.2%), yield (67.8%), and leaf phosphorus concentration compared with the control. The individual application of *Pseudomonas* sp. enhanced fruit weight (13.4%), polar diameter (7.9%), equatorial diameter (6.4%), soluble solids (3.9%), and fruit nitrogen concentration (28.6%). However, the control showed the highest anthocyanin levels (30.7%). In conclusion, *Pseudomonas* sp., either alone or in combination with Radix, represents a sustainable strategy to improve fig production and fruit quality.

**Keywords:** biostimulants, rhizobacteria, fig, roots.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de insumos agropecuarios ha transitado de la dependencia de agroquímicos a estrategias más sostenibles, diseñadas para minimizar los efectos negativos sobre la microflora y la fauna del suelo (Igiehon et al., 2024). Este cambio se ha visto acelerado por el agravamiento del cambio climático, que intensifica condiciones de estrés abiótico y repercute de forma adversa en el crecimiento y la productividad vegetal (Chieb & Gachomo, 2023). En este escenario, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) surgen como aliadas fundamentales gracias a su capacidad para mejorar la salud de las plantas mediante la producción de hormonas, la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de nutrientes esenciales (Bhattacharyya & Jha, 2012; Vejan et al., 2016).

Uno de los mecanismos más reconocidos de las PGPR es la excreción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular que solubilizan el fosfato del suelo, incrementando la disponibilidad de fósforo para las raíces (Paredes & Espinosa, 2009). Asimismo, la síntesis de ácido indol-3-acético (IAA) promueve la iniciación y elongación de raíces, potenciando la absorción de agua y nutrientes (Khare & Arora, 2010). En particular, especies del género *Pseudomonas* destacan por combinar la producción de IAA con la secreción de metabolitos secundarios capaces de inhibir fitopatógenos, favoreciendo un desarrollo vegetal equilibrado y resiliente (Sah et al., 2021).

En paralelo, ciertos cultivos han adquirido relevancia estratégica por su alto valor nutricional y su aporte a la seguridad alimentaria. Tal es el caso del higo (*Ficus carica* L.), fruto que se consume fresco y deshidratado y que se distingue por su concentración de fibra, minerales esenciales y compuestos fenólicos con elevada capacidad antioxidante (Arvaniti et al., 2019). Estudios recientes señalan que las variedades oscuras, especialmente en madurez plena, concentran mayores niveles de flavonoides y ácidos fenólicos en la piel, atributos relacionados con la prevención de daño oxidativo y la mejora de la salud intestinal. El mercado mundial refleja estas cualidades: la demanda de higo fresco se ha incrementado de forma constante, posicionando a México como un país con potencial para convertirse en líder global de esta industria (Soberanes et al., 2020).

No obstante, el incremento de la superficie cultivada y la presión por mantener rendimientos altos han favorecido el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas químicos, con consecuencias adversas para la salud del suelo y el ambiente. Frente a este panorama, el aprovechamiento de PGPR, particularmente *Pseudomonas* sp., ofrece un enfoque sostenible para la producción de higo, al reducir la dependencia de insumos sintéticos y mejorar simultáneamente la calidad de los frutos (Gándara & Gutiérrez, 2023).

Por todo lo anterior, la presente investigación se plantea evaluar el efecto de bacterias del género *Pseudomonas* sobre el crecimiento y la productividad del higo. Se espera demostrar que la inoculación con estas PGPR no solo optimiza la nutrición y el rendimiento, sino que también contribuye a mitigar los efectos del estrés abiótico, garantizando un sistema de producción resiliente y respetuoso con el medio ambiente. La integración de herramientas microbiológicas en el manejo agronómico del higo representa, así, una estrategia alineada con los objetivos de sostenibilidad y competitividad que demanda la agricultura contemporánea.

## JUSTIFICACIÓN

El desafío de producir alimentos de manera sostenible se intensifica a medida que los cultivos enfrentan estrés abiótico derivado del cambio climático, situación que compromete el rendimiento y la calidad de la producción agrícola (Chieb & Gachomo, 2023). En este contexto, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) han cobrado gran relevancia por sus múltiples mecanismos de acción, como la solubilización de fosfatos y la síntesis de hormonas vegetales, que mejoran la nutrición y la resiliencia de las plantas (Vejan et al., 2016; Paredes & Espinosa, 2009). Paralelamente, el higo (*Ficus carica* L.) se posiciona como un fruto de alto valor nutricional y creciente demanda internacional, con un aporte significativo de fibra, minerales y compuestos antioxidantes (Arvaniti et al., 2019; FAO, 2023). Sin embargo, su cultivo todavía depende en gran medida de fertilizantes y pesticidas sintéticos. Por ello, la incorporación de cepas de *Pseudomonas* sp. como PGPR ofrece una vía sostenible para incrementar el rendimiento y la calidad de los higos, al tiempo que se reduce la huella ambiental y se promueve la sanidad del suelo (Gándara & Gutiérrez, 2023). Esta propuesta responde tanto a la necesidad de sistemas agrícolas más ecológicos como al impulso económico derivado de la creciente demanda de higos frescos (Soberanes et al., 2020).

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar el efecto de *Pseudomonas* sp. en el enraizamiento y calidad de fruto en higuera (*Ficus Carica* L.)

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- evaluar los caracteres agronómicos en plantas de higuera.
- Evaluar los caracteres bioquímicos en frutos.
- Comparar el efecto en las plantas de higo al utilizar un producto comercial Radix 10000 y *Pseudomonas* sp.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Agricultura sostenible y manejo ecológico de cultivos**

La agricultura sostenible se ha consolidado como un enfoque integral para responder a los desafíos actuales que enfrenta la producción agrícola, tales como el aumento en la demanda de alimentos, la degradación de los recursos naturales y los efectos del cambio climático. Este modelo busca equilibrar la productividad con la conservación del medio ambiente, asegurando la viabilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas y para lograrlo, se promueven estrategias orientadas a la conservación del suelo, el uso eficiente del agua y la aplicación de prácticas agroecológicas (Al-Juthery et al., 2023; M.M. Agzamova, 2022). Uno de los pilares de la sostenibilidad agrícola es la gestión racional de los nutrientes, donde se prioriza la aplicación localizada y específica según las necesidades del cultivo permitiendo no solo mejorar la eficiencia en el uso de insumos, sino también mantener y restaurar la fertilidad del suelo a largo plazo (Shah y Wu, 2019; Al-Juthery et al., 2023). En paralelo, el manejo agroecológico de plagas representa una alternativa viable al uso excesivo de pesticidas sintéticos. Este enfoque se basa en el uso de mecanismos naturales, incluyendo enemigos naturales, rotación de cultivos, diversidad vegetal y técnicas culturales preventivas, que permiten reducir la incidencia de plagas sin comprometer la biodiversidad ni la salud del agroecosistema (Reddy, 2017). Asimismo, el manejo eficiente del recurso hídrico es un componente crítico en regiones con estrés hídrico creciente. La implementación de tecnologías de conservación de agua, como el riego por goteo, el uso de coberturas vegetales y la captación de agua de lluvia, son prácticas esenciales para mantener la productividad sin agotar las fuentes hídricas disponibles (Shah y Wu, 2019). La transición hacia sistemas agrícolas ecológicamente responsables demanda un compromiso conjunto entre instituciones, comunidades rurales y centros de investigación, con el objetivo de garantizar la seguridad alimentaria sin comprometer la integridad ecológica del planeta (M.M. Agzamova, 2022).

## **Impacto del cambio climático en la agricultura**

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales retos para la agricultura moderna, afectando directamente el rendimiento de los cultivos, la productividad ganadera y la estabilidad de los sistemas alimentarios. Las alteraciones en la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación y el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos como sequías e inundaciones están generando un impacto considerable en la fisiología vegetal y en los sistemas de producción agrícola (Sanchez y Riosmena, 2021). El incremento de las temperaturas puede modificar los ciclos fenológicos de las plantas, alterar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y disminuir los rendimientos, especialmente en cultivos sensibles al calor (Mittal y Kumar, 2016; Acharya et al., 2024). Por su parte, los fenómenos meteorológicos extremos intensifican la variabilidad productiva y aumentan el riesgo de pérdidas, afectando tanto a pequeños productores como a sistemas de producción a gran escala (Anjum et al., 2024).

A nivel edáfico, el cambio climático contribuye a la degradación del suelo mediante la pérdida de materia orgánica, la compactación y una menor capacidad de secuestro de carbono, lo cual debilita la estructura y fertilidad del suelo (Acharya et al., 2024). Además, las alteraciones en la disponibilidad y calidad del agua complican el manejo del riego y reducen la eficiencia de uso del recurso, afectando tanto a la agricultura como a la ganadería (Verma et al., 2024). Estas condiciones tienen un impacto directo en las comunidades rurales más vulnerables, donde se acentúan la inseguridad alimentaria y la pobreza. No obstante, frente a estos desafíos también emergen oportunidades para el desarrollo de prácticas agrícolas más resilientes, como la adopción de tecnologías adaptativas, sistemas de manejo integrado y enfoques sostenibles que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático (Vala et al., 2024).

## **Estrés abiótico y su efecto en el desarrollo vegetal**

El estrés abiótico representa uno de los principales factores limitantes para el crecimiento y la productividad de las plantas, ya que afecta procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, la transpiración y la absorción de nutrientes. Factores como la

sequía, la salinidad, las temperaturas extremas y las inundaciones interrumpen el desarrollo normal de las plantas, reduciendo su biomasa, la formación de tejidos y el contenido de clorofila (Zhang et al., 2023). Entre los efectos más comunes se encuentran la reducción de la eficiencia fotosintética, la menor conductancia estomática y una disminución en la eficiencia en el uso del agua, lo que repercute directamente en la productividad del cultivo (Khalid et al., 2019).

A nivel morfológico, el estrés abiótico suele provocar un menor crecimiento de brotes y raíces, así como una reducción general de la biomasa vegetal. Las plantas responden activando sistemas antioxidantes tanto enzimáticos como no enzimáticos que ayudan a mitigar los daños celulares causados por el estrés oxidativo (Khalid et al., 2019; Yasmin y Chakraborty, 2023). Actualmente, los programas de mejoramiento genético enfocan sus esfuerzos en ampliar la diversidad genética y en incorporar características de tolerancia al estrés presentes en parientes silvestres de los cultivos comerciales. Esto requiere un entendimiento profundo de los mecanismos de señalización y regulación del estrés, lo cual es clave para generar variedades con mayor tolerancia sin comprometer el rendimiento (Pawar et al., 2023; Zhang et al., 2023). Sin embargo, debido a la complejidad genética de estos rasgos, los métodos tradicionales de mejoramiento no siempre logran resultados efectivos. Por ello, es necesario integrar herramientas moleculares y biotecnológicas que permitan acelerar el desarrollo de cultivares resistentes, garantizando así la sostenibilidad agrícola en condiciones climáticas adversas (Yasmin y Chakraborty, 2023).

### **Microbioma del suelo y su relación con la salud de las plantas**

El microbioma del suelo, constituido por una amplia diversidad de microorganismos asociados a la rizosfera y a los tejidos radiculares desempeña un papel esencial en las plantas. Estas comunidades microbianas influyen en procesos clave como la absorción de nutrientes, el crecimiento vegetal, la resistencia a enfermedades y la tolerancia a condiciones de estrés abiótico (Das et al., 2022). Uno de los principales aportes del microbioma es su capacidad para transformar nutrientes no disponibles en formas asimilables por las plantas, mejorando su nutrición y desarrollo. Entre los grupos más relevantes destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), los

hongos micorrízicos arbusculares y las bacterias fijadoras de nitrógeno, que establecen relaciones simbióticas con diversos cultivos (Das et al., 2022; Yadav et al., 2021).

Además, ciertas bacterias beneficiosas del suelo, como *Pseudomonas* y *Bacillus*, poseen genes que permiten la producción de compuestos antimicrobianos capaces de suprimir patógenos del suelo, lo cual reduce la incidencia de enfermedades y mejora la supervivencia de las plantas (Wei et al., 2019; Raaijmakers y Mazzola, 2016). Estas comunidades también participan en la modulación de respuestas adaptativas frente a estreses abióticos como sequías, excesos hídricos o deficiencias nutricionales, en parte a través de la modificación de los exudados radiculares y la regulación de rutas de señalización en la planta (Dubey et al., 2019; Wei et al., 2019). La alta diversidad microbiana en el suelo se asocia con una mayor estabilidad ecológica y fertilidad agroecosistema, sin embargo, la composición y función del microbioma varía según el tipo de planta y las características fisicoquímicas del suelo (Chauhan et al., 2023; Trivedi et al., 2020). Las interacciones planta-microbio pueden ser simbióticas, comensales o antagónicas, mientras que los microorganismos beneficiosos promueven el desarrollo y la defensa vegetal, otros pueden competir por recursos o actuar como agentes patógenos (Chan et al., 2023). La rizosfera representa una zona clave de actividad biológica e interacción dinámica, fundamental para la funcionalidad del sistema suelo planta (Trivedi et al., 2020).

### **Rizósfera: estructura, función e interacción planta-microorganismo**

La rizosfera es la región del suelo estrechamente asociada a las raíces, en la que ocurren complejas interacciones fisicoquímicas y biológicas entre las plantas, el suelo y una gran diversidad de microorganismos. Este microhábitat dinámico alberga bacterias, hongos, arqueas y virus, todos con funciones específicas en el reciclaje de nutrientes, la salud vegetal y la estructuración del suelo (Berg y Smalla, 2009; Buée et al., 2009). La composición de la comunidad microbiana rizosférica está determinada por diversos factores, entre ellos la especie vegetal, el tipo de suelo, la arquitectura de las raíces y la naturaleza de los exudados radiculares (Yang et al., 2024). Estos exudados actúan como señales químicas que permiten a las plantas reclutar microorganismos beneficiosos o repeler patógenos, moldeando activamente su microbioma (Zhang et al., 2017; Yang et

al., 2024). En este entorno químicamente complejo, los microorganismos rizosféricos participan activamente en la transformación de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y zinc en formas biodisponibles para la planta, favoreciendo su crecimiento y rendimiento (Hakim et al., 2021; Berg y Smalla, 2009). Destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), que generan hormonas, enzimas y compuestos bioactivos que mejoran la tolerancia al estrés ambiental y estimulan el desarrollo vegetal. Además, muchos de estos microorganismos ejercen un efecto protector, ya que actúan como barrera frente a patógenos, inducen respuestas de resistencia sistémica en la planta y contribuyen a una modulación equilibrada del sistema inmunológico vegetal (HepseCrgon y Moleleki, 2023). La competencia y cooperación entre bacterias de la rizosfera, mediante la producción de antibióticos o la competencia por nutrientes, también influye en la estabilidad y funcionalidad de la comunidad microbiana (Buée et al., 2009). Por tanto, la rizosfera representa una zona crítica de comunicación entre reinos, donde las interacciones moleculares entre plantas y microbios determinan la salud del cultivo, su capacidad de adaptación y la eficiencia del sistema agroecológico en su conjunto (Yuan et al., 2022; Yang et al., 2024).

### **Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)**

Ante la creciente preocupación por los efectos negativos del uso excesivo de agroquímicos, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) se presentan como una alternativa sustentable para incrementar la productividad agrícola, mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la resiliencia de las plantas frente a estreses y enfermedades. Estas bacterias benefician directamente al desarrollo vegetal a través de procesos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y potasio, la oxidación de azufre y la movilización de micronutrientes como hierro y cobre (Vanamala et al., 2021; Jha y Saraf, 2015; Riaz et al., 2020). Además, las PGPR sintetizan fitohormonas como ácido indolacético (AIA), giberelinas, citoquininas y moduladores del etileno, que influyen en la elongación radicular, la diferenciación celular y la respuesta al estrés (Jeyanthi y Kanimozhi, 2018). En el control biológico, estas bacterias suprimen patógenos mediante antibiosis, competencia por nutrientes y nicho, parasitismo y la activación de mecanismos de resistencia sistémica en la planta.

También pueden interferir con la señalización de patógenos y la formación de biopelículas, dificultando su establecimiento (Jha y Saraf, 2015; Riaz et al., 2020; Bhattacharyya et al., 2011).

Su aplicación como biofertilizantes mejora la absorción de nutrientes, reduce el uso de fertilizantes químicos y promueve la salud del suelo, lo que ha impulsado el crecimiento del mercado de bioinsumos (Vanamala et al., 2021; Riaz et al., 2020). Algunas cepas también actúan como biopesticidas al inducir defensas inmunitarias y producir compuestos antimicrobianos, convirtiéndose en una alternativa sostenible a los pesticidas convencionales (Reddy, 2012). Asimismo, ciertas PGPR facilitan la fitorremediación, incrementando la tolerancia de las plantas a metales pesados y contaminantes del suelo (Grobela et al., 2015). La efectividad de las PGPR en campo depende de su capacidad para colonizar la rizosfera, lo cual implica reconocer exudados radiculares, formar biopelículas y evitar la detección por el sistema inmune vegetal. Las cepas más competitivas presentan mejores resultados bajo condiciones agrícolas reales (Vanamala et al., 2021; Jha y Saraf, 2015). No obstante, su eficacia puede variar según las condiciones edafoclimáticas y el cultivo, por lo que es fundamental seleccionar cepas adaptadas a contextos específicos (Grobela et al., 2015).

### **Producción de fitohormonas por PGPR (ácido indol-3-acético, IAA)**

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) sintetizan ácido indolacético (AIA) principalmente a través de rutas metabólicas dependientes del triptófano, lo que les permite mantener una producción eficaz bajo distintas condiciones ambientales. Especies como *Bacillus amyloliquefaciens* y *Paraburkholderia xenovorans* utilizan predominantemente las vías del ácido indol-3-pirúvico (IPyA) y de la indol-3-acetamida (IAM) para producir AIA. Genes clave involucrados en estas rutas como *ysnE*, *dhaS*, *yhcC*, *yhcX* y *patB* son esenciales, y su desactivación conlleva una disminución significativa en la biosíntesis de esta fitohormona (Shao et al., 2015; Vega et al., 2024; Etesami y Glick, 2024). El triptófano ambiental actúa como precursor directo, y su presencia estimula la síntesis de AIA, reforzando su papel central en estas rutas biosintéticas (Vega et al., 2024; Idris et al., 2007). Notablemente, la producción de AIA por PGPR es estable en un amplio rango de pH (5–9), temperaturas elevadas hasta

40 °C y condiciones salinas (hasta 5 % de NaCl), y ciertas cepas incluso optimizan su producción bajo condiciones alcalinas o salinas moderadas (Etesami y Glick, 2024). Además, la disponibilidad de diferentes fuentes de carbono y nitrógeno puede modular la producción de AIA entre distintos aislados bacterianos (Chandra et al., 2018). El AIA microbiano desempeña un papel crucial en la estimulación del crecimiento vegetal, promoviendo una arquitectura radicular más desarrollada, una mejor absorción de nutrientes y mayor tolerancia al estrés ambiental (Veerasamy et al., 2021; Idris et al., 2007). Esta capacidad de adaptación y eficacia en distintos ambientes convierte a las PGPR productoras de AIA en herramientas prometedoras para la formulación de biofertilizantes orientados a sistemas agrícolas sostenibles (Yousef, 2018; Etesami y Glick, 2024).

### **Solubilización de fósforo por microorganismos del suelo**

El fósforo (P) constituye un nutriente esencial para el desarrollo vegetal; sin embargo, una proporción considerable del fósforo presente en el suelo se encuentra en formas químicamente inaccesibles para las plantas (Pang et al., 2024). En este contexto, los microorganismos del suelo, en particular los denominados microorganismos solubilizadores de fosfato (MSP), desempeñan un papel crucial al transformar el fósforo insoluble en compuestos biodisponibles, lo que representa una alternativa sostenible frente al uso intensivo de fertilizantes sintéticos (Silva et al., 2023).

Los MSP, que incluyen bacterias, hongos y actinomicetos, liberan fósforo inorgánico principalmente a través de la secreción de ácidos orgánicos como el glucónico, oxálico y cítrico, los cuales disminuyen el pH del suelo y quelatan los iones metálicos, facilitando la liberación del fosfato de los complejos minerales (Tiomofeeva et al., 2022). Adicionalmente, estos microorganismos contribuyen a la mineralización del fósforo orgánico mediante la acción de enzimas como fosfatasas y fitasas, lo que incrementa la disponibilidad de este nutriente contenido en la materia orgánica (Silva et al., 2023).

La inoculación de suelos o plantas ha demostrado mejorar la absorción de fósforo, incrementar el rendimiento agrícola y disminuir la dependencia de fertilizantes químicos. Este proceso no solo reduce los impactos ambientales negativos, sino que también favorece la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles (Alori et al., 2017). Asimismo, se están evaluando para aplicaciones en biorremediación y

recuperación de suelos salinos o degradados, ampliando sus beneficios potenciales (Pang et al., 2024). La diversidad microbiana incluye géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Trichoderma* y *Penicillium* (Wan et al., 2020). No obstante, su eficacia depende de factores como el tipo de suelo, las condiciones ambientales y su interacción con el microbiota nativo (Alori et al., 2017). Investigaciones metagenómicas recientes señalan que los suelos agrícolas y naturales exhiben estrategias diferenciadas de adquisición de fósforo, lo que resalta la necesidad de diseñar soluciones microbianas específicas y adaptadas a cada contexto (Wu et al., 2022).

### **Fijación biológica de nitrógeno por bacterias asociadas a plantas**

La fijación biológica de nitrógeno constituye un proceso natural esencial mediante el cual determinadas bacterias convierten el nitrógeno atmosférico en compuestos asimilables por las plantas, lo que disminuye la dependencia de fertilizantes químicos y favorece prácticas agrícolas sostenibles (Timofeeva et al., 2024). Estas bacterias, que pueden establecer relaciones simbióticas, vivir como endófitas o habitar libremente en la rizósfera, cumplen funciones diversas en el proceso, aportando beneficios tanto a especies leguminosas como no leguminosas (Wu et al., 2022).

En las leguminosas, las rizobias inducen la formación de nódulos radicales, mientras que *Frankia* establece asociaciones con plantas actinorrhizas, y las cianobacterias lo hacen con cícadas y algunos helechos (Burriss & Roberts, 1993). Dichas interacciones dependen de estructuras especializadas —como nódulos o heterocistos— y de rutas de señalización altamente reguladas que permiten la actividad de la enzima nitrogenasa (Zhang et al., 2023). En contraste, los cultivos no leguminosos, como maíz, arroz o caña de azúcar se benefician de bacterias como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella* y *Burkholderia*, capaces de colonizar la rizósfera o los tejidos internos de las plantas, donde fijan nitrógeno y, en muchos casos, producen fitohormonas que estimulan el crecimiento (Aasfar et al., 2021).

Investigaciones recientes han revelado comunidades fijadoras de nitrógeno en la superficie foliar e incluso en la savia de la xilema, lo que representa un aporte adicional al suministro de este nutriente a las plantas (Zhu et al., 2023). Del mismo modo, especies

como *Azotobacter* y *Bacillus*, así como consorcios de diazótrofos, están siendo evaluados para su aplicación en campo, y ciertas cepas genéticamente modificadas han mostrado incrementos notables en la actividad de la nitrogenasa y en la excreción de amonio (Zhou et al., 2025).

En general, las bacterias asociadas a las plantas desempeñan un papel central en la FBN, apoyando el funcionamiento de los ecosistemas naturales y contribuyendo al desarrollo de una agricultura más sostenible (Aasfar et al., 2021). Los avances en el entendimiento de las interacciones simbióticas, asociativas y endofíticas, junto con el diseño de biofertilizantes más eficientes, abren nuevas perspectivas para disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados y aumentar la productividad de los cultivos.

### **Género *Pseudomonas*: características, ecología y beneficios agronómicos**

El género *Pseudomonas* comprende bacterias gramnegativas de notable versatilidad, ampliamente distribuidas en suelos, ambientes acuáticos, tejidos vegetales e incluso en ecosistemas extremos (Sah et al., 2021). Su plasticidad metabólica y ecológica les permite adaptarse a múltiples condiciones, establecer interacciones con las plantas y desempeñar funciones relevantes en la agricultura sostenible, tanto en la promoción del crecimiento vegetal como en el control biológico de fitopatógenos (Khoshru et al., 2024).

Características principales del género *Pseudomonas*. Estas bacterias poseen un metabolismo altamente flexible que les facilita degradar diversos compuestos y prosperar en ambientes heterogéneos, incluidos suelos fríos o contaminados (Chauhan et al., 2023). De acuerdo con Sah et al. (2021), dentro del género se incluyen especies con funciones beneficiosas —como *P. fluorescens*, *P. putida* y *P. chlororaphis*, así como especies patógenas, entre ellas *P. syringae*. Además, se caracterizan por la síntesis de metabolitos secundarios tales como sideróforos, antibióticos, enzimas hidrolíticas y fitohormonas (auxinas y giberelinas), los cuales resultan esenciales tanto para la promoción del crecimiento vegetal como para la defensa contra patógenos (Singh et al., 2022).

Ecología y diversidad. Las *Pseudomonas* habitan principalmente en la rizósfera, en el interior de las plantas y en medios acuáticos, mostrando una notable diversidad genética y funcional (Sah et al., 2021). Asimismo, presentan una elevada capacidad de adaptación a condiciones de estrés abiótico, como salinidad, sequía o presencia de metales pesados, pudiendo colonizar entornos extremos, incluidos suelos antárticos o áreas contaminadas (Khoshru et al., 2024).

Beneficios agronómicos. Estas bacterias cumplen funciones clave como biofertilizantes, ya que contribuyen a la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo y potasio, y la mejora en la absorción de nutrientes (Sah et al., 2021; Mehmood, 2023). Paralelamente, actúan como agentes de biocontrol, inhibiendo hongos, bacterias y nematodos fitopatógenos mediante antibiosis, competencia y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Mehmood, 2023; Poli et al., 2024; Yang et al., 2025). De igual forma, favorecen la tolerancia de los cultivos frente a condiciones climáticas y ambientales adversas, lo que incrementa la resiliencia y productividad agrícola (Mehmood, 2023; Singh et al., 2022; Zoralski & Filion, 2023).

### **Interacción planta-*Pseudomonas***

Las especies del género *Pseudomonas*, en particular aquellas clasificadas como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), contribuyen de manera significativa al desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos fisiológicos y bioquímicos. Una de sus funciones más relevantes es la producción de fitohormonas, como auxinas, giberelinas y citoquininas, que favorecen la elongación de raíces y brotes, así como la formación de raíces laterales, lo que amplía la capacidad de exploración del suelo y la absorción de nutrientes (Ahmed et al., 2025; Singh et al., 2022). Asimismo, estas bacterias intervienen en la solubilización de nutrientes esenciales, entre ellos fósforo y hierro —a través de la producción de sideróforos—, y también participan en la fijación de nitrógeno, procesos que en conjunto optimizan la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte de las plantas (Ansari & Ahmad, 2019; Ahmed et al., 2025; Yang et al., 2025).

Otro mecanismo destacado es la modulación del transporte de azúcares, que asegura un flujo más eficiente de energía entre raíces y brotes, lo cual se traduce en un mejor balance metabólico y en un crecimiento más equilibrado (Desrut et al., 2020). Además, la síntesis de la enzima ACC desaminasa desempeña un papel crucial al reducir los niveles de etileno asociados al estrés, incrementando la tolerancia de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas (Glick & Nascimento, 2021). De igual manera, *Pseudomonas* es capaz de inducir resistencia sistémica en las plantas y ejercer un control biológico frente a fitopatógenos mediante la producción de antibióticos y compuestos antifúngicos, fortaleciendo la defensa natural de los cultivos (Ahmed et al., 2025; Singh et al., 2022).

### **Producción de metabolitos secundarios por *Pseudomonas***

Las especies del género *Pseudomonas* destacan por su capacidad de sintetizar una amplia variedad de metabolitos secundarios, entre los que se incluyen antibióticos como fenazinas, pirrolnitrinas, 2,4-diacetilfloroglucinol y pirroluteorina; sideróforos como piocianina y pioverdina; así como lipopeptidos, ramnolípidos y otros compuestos con propiedades antifúngicas, antibacterianas y promotoras del crecimiento vegetal (Gross & Loper, 2009; Wang et al., 2024). Estos metabolitos cumplen funciones esenciales en la competencia microbiana, la estimulación del crecimiento de las plantas y el control biológico de diversos fitopatógenos (Zang et al., 2022; Shahid et al., 2017).

La síntesis de metabolitos secundarios en *Pseudomonas* se encuentra regulada por complejas redes de señalización, dentro de las cuales destacan los sistemas de quorum sensing y los sistemas de dos componentes, como GacA/GacS y ApdA, que permiten a las bacterias coordinar la producción de compuestos en función de la densidad poblacional y las condiciones del entorno (Zhang et al., 2022). El estilo de vida bacteriano ejerce también un papel determinante: por ejemplo, la formación de biofilms incrementa tanto la diversidad como la cantidad de metabolitos sintetizados, en particular acil-homoserina lactonas y fenazinas (Rieusset et al., 2020). De igual manera, factores ambientales como la disponibilidad de nutrientes y la composición del medio influyen directamente en la regulación y síntesis de dichos compuestos (Neve et al., 2021).

Además de su importancia ecológica, *Pseudomonas* se ha consolidado como una plataforma biotecnológica para la producción industrial de metabolitos secundarios de alto valor, como fenazinas, ramnolípidos y poliQUÉTIDOS (Zhang et al., 2022; Saati et al., 2022; Desrut et al., 2020). Mediante estrategias de ingeniería genética y reducción genómica, es posible optimizar los rendimientos de producción, lo que abre nuevas oportunidades para aplicaciones agrícolas e industriales (Shen et al., 2017; Schwanemann et al., 2023). Finalmente, la amplia diversidad genética entre cepas de *Pseudomonas* constituye una fuente prometedora para el descubrimiento de metabolitos novedosos con potencial farmacológico y agronómico (Saati et al., 2022).

### **Uso de bioinoculantes microbianos en la agricultura moderna**

Los bioinoculantes microbianos, conformados por bacterias, hongos y algas con funciones benéficas, representan una herramienta clave para mejorar el crecimiento y desarrollo vegetal a través de múltiples mecanismos fisiológicos y ecológicos (Kaur et al., 2022). Entre sus principales aportes se encuentran la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y potasio, la síntesis de fitohormonas, el control biológico de patógenos y la potenciación de la tolerancia frente a distintos tipos de estrés, tanto abiótico como biótico (Kour et al., 2020; Khan et al., 2023; Shahwar et al., 2023). A estos beneficios se suma su papel en la restauración de la fertilidad del suelo y en el fortalecimiento de la biodiversidad microbiana, lo que contribuye a reducir la dependencia de insumos químicos como fertilizantes y pesticidas, favoreciendo un modelo agrícola más sostenible (O'Callaghan et al., 2022).

En cuanto a sus aplicaciones, los bioinoculantes se clasifican en diferentes categorías. Los biofertilizantes incrementan la disponibilidad y eficiencia en el uso de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y zinc, promoviendo así un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo (Kour et al., 2020; Shahwar et al., 2023; Kaur et al., 2022). Por otro lado, los biopesticidas ofrecen alternativas al control químico de plagas y enfermedades mediante la producción de compuestos antimicrobianos y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Elnahal et al., 2022; Kumar et al.,

2022). Una estrategia complementaria es el uso de consorcios microbianos, en los cuales la combinación de distintas cepas genera sinergias que potencian los efectos positivos y aumentan la resiliencia de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas (Khan et al., 2023; Negi et al., 2024). Finalmente, los endófitos y microalgas representan una frontera emergente en el desarrollo de bioinoculantes, pues además de mejorar la tolerancia al estrés, aportan beneficios adicionales en la calidad del suelo y en la productividad agrícola (Sharma et al., 2023; Adeleke et al., 2022).

### **Importancia económica y social del cultivo del higo (*Ficus carica* L.)**

El cultivo del higo (*Ficus carica* L.) representa una alternativa agrícola de gran relevancia económica y social, particularmente en regiones mediterráneas, áridas y semiáridas, donde contribuye a la diversificación productiva, la generación de ingresos y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria (Isa et al., 2020). Desde una perspectiva económica, se considera un cultivo altamente rentable debido a su viabilidad financiera y rápida recuperación de la inversión, como se ha evidenciado en experiencias de países como India y Malasia (Rasool et al., 2023). En este sentido, el higo se posiciona como una opción estratégica de alto valor para diversificar la oferta agrícola y mejorar los ingresos de pequeños productores (Lokappa, 2018; Ling et al., 2022). A nivel global, naciones como Turquía, Egipto, Marruecos y España lideran la producción y exportación, generando importantes divisas a través del comercio de higos frescos y secos, así como de sus subproductos con aplicaciones en las industrias alimentaria y farmacéutica (Ling et al., 2022; Rasool et al., 2023). Adicionalmente, su adaptabilidad a condiciones de sequía y suelos marginales refuerza su valor como cultivo resiliente en zonas áridas y semiáridas, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y a la seguridad alimentaria en contextos de cambio climático (Elmeknassia et al., 2025; Chithiraichelvan et al., 2017).

En cuanto a su relevancia social, el higo destaca por su valor nutricional y cultural, ya que constituye una fuente importante de fibra, minerales y antioxidantes, además de ser un componente esencial de dietas tradicionales saludables, como la mediterránea. Su consumo y producción poseen también un trasfondo histórico y cultural en diversas

sociedades (Mazzeo et al., 2024). A nivel comunitario, la producción de higos promueve la cohesión social mediante el intercambio de variedades locales y conocimientos agrícolas, fortaleciendo la identidad cultural y la cooperación entre agricultores (Hmimsa et al., 2024). Asimismo, la cadena de valor asociada al cultivo y procesamiento del higo genera oportunidades de diversificación productiva y empleo en áreas rurales, con un impacto positivo en la inclusión de mujeres y jóvenes (Ling et al., 2022).

### **Valor nutricional y propiedades funcionales del higo**

El higo (*Ficus carica* L.) es ampliamente reconocido por su valor nutricional y su potencial como alimento funcional, debido a la presencia de compuestos bioactivos, fibra dietética, minerales y antioxidantes que contribuyen a la salud humana (Murthy et al., 2024). Investigaciones recientes han profundizado en la caracterización de su composición química, incluyendo tanto el fruto como sus subproductos, además de evaluar las diferencias entre variedades y formas de procesamiento.

Desde el punto de vista nutricional, el higo constituye una fuente importante de carbohidratos, fibra, proteínas, vitaminas (C, A, K) y minerales esenciales como potasio, calcio, magnesio y hierro. Sus semillas, por su parte, contienen ácidos grasos insaturados que enriquecen su perfil alimenticio (Alzahrani et al., 2024; Teruel-Andreu et al., 2023; Irchad et al., 2023). Un aspecto particularmente relevante es su elevado contenido de polifenoles, flavonoides y antocianinas, compuestos responsables de su capacidad antioxidante y de múltiples beneficios asociados a la salud (Tikent et al., 2025; Alzahrani et al., 2024). Cabe destacar que no solo la pulpa, sino también las semillas, la cáscara y las hojas, concentran altos niveles de metabolitos funcionales con potencial aplicado (Irchad et al., 2023; Yang et al., 2023).

En términos de propiedades bioactivas, los higos y sus derivados han demostrado efectos antioxidantes, antimicrobianos, antiinflamatorios, antidiabéticos e incluso potencial anticancerígeno (Tikent et al., 2025). Su consumo regular se asocia a beneficios en la salud ósea, cardiovascular, digestiva y metabólica, mientras que su contenido en fibra favorece el tránsito intestinal (Kaul & Rehal, 2022). Diversos productos derivados — como pastas, mermeladas o polvos de higo— mantienen o incluso potencian estas

características funcionales (Tikent et al., 2025). Asimismo, se han documentado variaciones significativas en el perfil nutricional y bioactivo según la variedad de higo y las distintas partes del fruto (pulpa, semillas, cáscara) (Irchad et al., 2023). Finalmente, el procesamiento tecnológico (como el secado, la elaboración de mermeladas, pastas o confituras) puede modificar la disponibilidad de nutrientes y compuestos bioactivos; sin embargo, una gestión adecuada permite incrementar tanto la estabilidad como el valor funcional del producto final (Manik et al., 2025).

### **Demanda internacional del higo y oportunidades para México**

El higo (*Ficus carica* L.) se ha consolidado como un cultivo emergente en México, impulsado tanto por su elevado valor nutricional como por la creciente demanda en los mercados internacionales. En los últimos años, la superficie cultivada ha alcanzado 1,357 hectáreas distribuidas en 14 estados del país, con una producción aproximada de 7,704 toneladas anuales, concentradas principalmente en Morelos, Baja California y Veracruz. Desde 2015, México exporta higo fresco hacia Estados Unidos, lo que ha abierto nuevas oportunidades comerciales y de diversificación agrícola (Bautista et al., 2021; Martínez et al., 2022).

Las proyecciones de expansión del cultivo muestran un panorama favorable. Modelos de idoneidad climática señalan que amplias zonas del norte y centro del país presentan condiciones óptimas para el establecimiento de huertos de higo, y que, bajo ciertos escenarios de cambio climático, la superficie potencialmente apta podría incluso incrementarse (Martínez et al., 2022). Asimismo, la incorporación de valor agregado mediante la transformación en productos como higos en almíbar, deshidratados, mermeladas o compostas representa una vía estratégica para diversificar mercados y mejorar la rentabilidad. Este potencial puede potenciarse mediante la implementación de soluciones tecnológicas y de gestión eficientes en la cadena de suministro (Lagarda et al., 2022).

El acceso al mercado estadounidense y la tendencia global hacia alimentos saludables y funcionales constituyen ventajas competitivas que favorecen tanto la exportación de higos frescos como de productos procesados (Bautista et al., 2021). Sin embargo,

persisten retos importantes que limitan el desarrollo pleno de esta cadena productiva. Entre ellos, destacan las pérdidas significativas ocasionadas por plagas como la mosca negra del higo (*Silba adipata*) y especies del género *Neosilba*, que pueden reducir hasta en un 65% la producción en precosecha y generan restricciones fitosanitarias en el comercio internacional. El control de estas plagas sigue siendo limitado, lo que refuerza la necesidad de establecer estrategias integrales de manejo (Lasa et al., 2025; Paniagua et al., 2024). A esto se suma la escasa infraestructura de procesamiento en el país, que restringe la capacidad de generar productos de mayor valor agregado y de responder a la creciente demanda de mercados internacionales (Lagarda et al., 2022).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de tipo cenital con una radiación PAR 594  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  así como también una temperatura máxima de 40 °C y una temperatura mínima de 18 °C, dicho invernadero está ubicado en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), durante el periodo comprendido entre marzo de 2023 y diciembre de 2024. Se establecieron cuatro tratamientos bajo un diseño de bloques completos al azar: 1) testigo, 2) Radix 10000, 3) *Pseudomonas* sp. a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC  $\text{ml}^{-1}$ , y 4) mezcla de *Pseudomonas* sp. en la misma concentración combinada con Radix 10000. El material vegetal se obtuvo de la variedad Black Mission, ésta tiene una gran importancia nutricional debido a su rico contenido en vitaminas, minerales, fibra y antioxidantes. Las varetas fueron obtenidas de plantas en producción del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Los tratamientos se aplicaron a las varetas, utilizando cinco repeticiones por tratamiento con ocho plantas cada una. Las varetas se plantaron en bolsas de polietileno de 3.0 L, utilizando un sustrato compuesto por peat-moss, suelo franco arcilloso y perlita en una proporción de 40:30:30. Antes de la plantación, las varetas fueron almacenadas en refrigeración a 10°C durante una semana, esta es una técnica conocida como estratificación en frío, que ayuda a inducir el enraizamiento y el brote de nuevas plantas. Esto simula el paso del invierno, permitiendo que la planta entre en un período de latencia. Durante la refrigeración, se detienen ciertos procesos metabólicos, pero también se prepara a la planta para que, una vez trasplantada en un ambiente más cálido, reanude su crecimiento con mayor vigor.

Previo a la actividad de trasplante, las varetas que recibieron tratamientos con bacterias fueron sumergidas en una solución bacteriana de *Pseudomonas* sp. ( $1 \times 10^8$  UFC  $\text{ml}^{-1}$ ) durante 30 minutos. Las varetas del tratamiento testigo se plantaron sin tratamiento previo. Para el tratamiento que combinaba *Pseudomonas* sp. y Radix 10000, las varetas fueron sumergidas en la solución bacteriana y luego se les aplicó RADIX 10000 antes del trasplante. Al tratamiento 2, solo se aplicó Radix 10000 antes del trasplante.

Se evaluaron diferentes variables agronómicas. Longitud de raíz, Número de frutos por planta, peso de fruto con balanza de la marca Steren, diámetro ecuatorial, diámetro

polar con el apoyo de un vernier de la misma marca, solidos solubles totales (grados brix) con el uso de refractómetro de la marca ATC, El rendimiento fue calculado por planta (RFP) en gramos, de acuerdo con la siguiente formula:

$$RFP = NUF \times PEF$$

Donde:

NUF: Número de frutos por planta, PEF: Peso promedio de fruto.

En julio de 2023, las plantas fueron trasplantadas a macetas de 15 L, y se realizó la poda de formación.

Las variables de fruto se midieron en etapa reproductiva durante cada cosecha. Posteriormente, las plantas fueron trasplantadas a contenedores de 30 L en julio del 2024, y durante todo el periodo del cultivo, desde la plantación hasta la fructificación, se fertilizaron con una solución Steiner al 60% y se aplicaron bacterias cada mes.

Finalmente, para cada variable evaluada, se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Duncan, utilizando el software estadístico Infostat 2023.

### 1. Tratamientos evaluados

	Tratamiento
T0	Testigo absoluto
T1	Radix 10000
T2	<i>Pseudomonas</i> sp (1x10 <sup>8</sup> UFC ml <sup>-1</sup> )
T3	Mezcla de radix 10000 y <i>Pseudomonas</i> sp (1x10 <sup>8</sup> UFC ml <sup>-1</sup> )

### Determinación de antocianinas

Para la determinación indirecta de antocianinas totales, se preparó una solución extractora compuesta por metanol acidificado con ácido clorhídrico (HCl) al 0.1% (v/v).

Esta solución se dejó reposar a temperatura ambiente durante 24 horas para asegurar su homogeneidad y estabilidad química.

Al día siguiente, se cosecharon frutos frescos de higo, seleccionando aquellos con uniformidad en tamaño y grado de madurez por tratamiento. Se procedió a extraer manualmente el epicarpio (piel) de cada fruto, ya que esta parte contiene la mayor concentración de antocianinas. Las muestras de epicarpio fueron completamente sumergidas en la solución extractora previamente preparada.

Posteriormente, se realizó el macerado del tejido con la ayuda de un homogeneizador para facilitar la liberación de antocianinas. La mezcla resultante fue filtrada utilizando papel filtro, separando los residuos sólidos del extracto líquido. El filtrado se aforó en un matraz volumétrico a un volumen definido y se protegió de la luz envolviéndolo con papel aluminio, con el fin de evitar la degradación de los pigmentos. El extracto fue almacenado en refrigeración a 4 °C durante 24 horas para estabilizar los compuestos extraídos y minimizar procesos oxidativos.

Transcurrido este periodo, se midió la absorbancia del extracto utilizando un espectrofotómetro a una longitud de onda de 532 nm, correspondiente al máximo de absorción para antocianinas. El contenido total de antocianinas se determinó utilizando una curva estándar construida con cianidina-3-glucósido, expresando los resultados en miligramos por kilogramo de muestra fresca (mg/kg).

La fórmula utilizada para el cálculo fue la siguiente:

$$AT \text{ (mg/kg)} = (\text{Abs} \times V_{\text{ext}} \times 1000) / (\epsilon \times L \times m)$$

Donde:

**Abs:** absorbancia medida a 532 nm

**V<sub>ext</sub>:** volumen del extracto (mL)

**ε:** coeficiente de extinción molar de la cianidina-3-glucósido (26,900 L·mol<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>)

**L:** longitud de la celda del espectrofotómetro (1 cm)

**m:** masa de la muestra fresca (kg)

### **Determinación de fósforo**

Para la determinación del contenido de fosforo, se utilizó el método colorimétrico mediante espectrofotometría. Se incinero 1 gramo de muestra seca en una mufla de 500-600 °C hasta obtener cenizas blancas o gris claro, las cuales se disolvieron en 50 ml de ácido clorhídrico al 50%. De esta solución, se tomó un alicuota de 1 ml y se transfirió a un tubo de ensayo previamente lavado con detergente libre de fosforo y enjuagado con agua destilada. Posteriormente, se adicionaron 5 ml de una solución de molibdato de amonio al 5% y 2 ml del reactivo ansa, agitando suavemente para homogenizar la mezcla. La reacción se dejó reposar durante 20 minutos a temperatura ambiente permitiendo el desarrollo del complejo color azul molibdénico. Transcurrido este tiempo la solución se transfirió a una celdilla limpia y se midió la absorbancia a 650 nm utilizando un espectrofotómetro (UV-Vis modelo V-1100/UV-1100, (china), empleando agua destilada como blanco. La concentración de fosforo se obtuvo por interpolación en una curva de calibración construida a partir de soluciones estándar de fosfato y los resultados fueron ajustados en función de la dilución y el peso seco de la muestra analizada.

### **Concentración bacteriana**

La concentración bacteriana se estimó mediante la medición de la turbidez en un espectrofotómetro (UV-Vis modelo V-1100/UV-1100, (china) a 600 nm. Para ello se ajustó a diferentes diluciones seriadas en solución salina estéril, registrando la densidad óptica (DO) de cada dilución. Paralelamente, se realizó el conteo viable de DO con las unidades formadoras de colonias (CFU mL<sup>-1</sup>). Una vez generada la curva, las concentraciones bacterianas se determinaron de manera indirecta utilizando las lecturas espectrofotométricas.

### **Determinación de nitrógeno**

Para la determinación del contenido total de nitrógeno se empleó el método Kjeldahl, el cual se basa en la conversión del nitrógeno orgánico en ion amonio mediante digestión ácida, seguido de su transformación en amoníaco por alcalinización, y posterior destilación y titulación. Se pesaron aproximadamente 0.05 g de muestra seca y molida por duplicado, las cuales fueron colocadas en tubos digestores resistentes al calor. A cada muestra se le adicionaron 4 mL de una mezcla digestora compuesta por ácido sulfúrico concentrado, sulfato de potasio ( $K_2SO_4$ ), óxido de mercurio ( $HgO$ ), y un catalizador de cobre y selenio. La digestión se llevó a cabo bajo calentamiento controlado hasta lograr una coloración verde limón, indicando la conversión completa del nitrógeno orgánico a ion amonio ( $NH_4^+$ ). Luego del enfriamiento, la solución digerida se sometió a destilación en presencia de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) al 50%, liberando el amoníaco ( $NH_3$ ), el cual fue capturado en un matraz conteniendo ácido bórico al 2% y unas gotas de indicador mixto. Finalmente, el amoníaco capturado fue cuantificado mediante una titulación directa con ácido sulfúrico 0.025 N, registrando el volumen consumido hasta alcanzar el punto final visualizado por el cambio de color. Los resultados fueron calculados considerando el volumen de ácido consumido, la normalidad del ácido titulante y el peso de la muestra, expresando el contenido de nitrógeno total como porcentaje en base seca.

$$\text{Nitrógeno (\%)} = ((V_m - V_b) \times N \times 14.007 \times 100) / p$$

**Donde:**

**V<sub>m</sub>** = Volumen de ácido consumido en la titulación de la muestra (mL)

**V<sub>b</sub>** = Volumen de ácido consumido en el blanco (mL)

**N** = Normalidad del ácido sulfúrico utilizado en la titulación (eq/L)

**14.007** = Peso atómico del nitrógeno (g/mol)

**P** = Peso de la muestra analizada (mg)

El resultado se expresa como porcentaje de nitrógeno con base en el peso seco de la muestra.

**Análisis estadístico**

Los datos colectados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA) y una comparación de medias con Tukey al 0.05. Se utilizó el paquete estadístico InFoStat 2023.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento con *Pseudomonas* sp. + Radix respecto al control presentó un incremento significativo del 5.2% en el NUF, y los tratamientos control, Radix y *Pseudomonas* sp. presentaron los valores más bajos y estadísticamente iguales entre sí (Figura 1). Lo cual sugiere una mejora atribuida al efecto combinado de la rizobacteria y el enraizador comercial, favoreciendo la absorción de nutrientes esenciales y la producción de fitohormonas que estimulan el desarrollo reproductivo, y esto debido a que solubiliza fósforo mediante ácidos orgánicos y enzimas fosfatasa, además de sintetizar fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, promoviendo la producción de raíces y crecimiento de la planta (Beltrán-Pineda y Bernal-Figueroa 2022). Estos resultados concuerdan con el efecto obtenido por Villaseñor-Tulais et al. (2023), pues ellos reportaron un aumento del 65.5% en frutos de tomate de cáscara con *P. fluorescens*, mientras que Camacho et al. (2022) observaron un incremento hasta del 96% en chile jalapeño con *Serratia liquefaciens*.

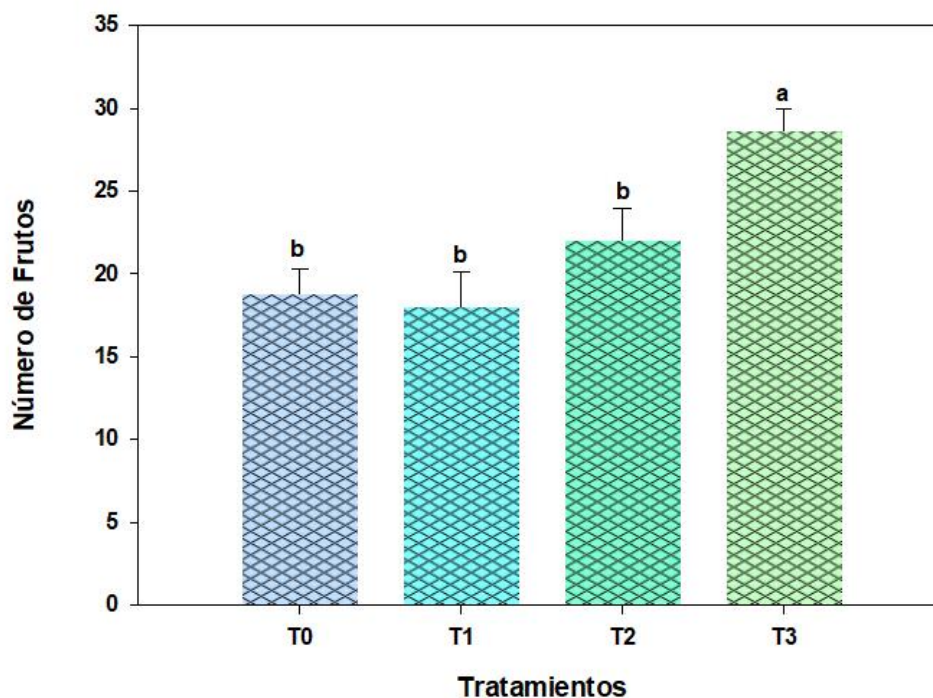


Figura 1. Número de frutos.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

La aplicación de *Pseudomonas* sp. por sí sola promovió un incremento significativo en el PEF registrando un aumento del 13.4% respecto al control. Aunque el tratamiento *Pseudomonas* sp. + Radix no mostró diferencias significativas frente a los demás tratamientos, superó numéricamente al control y al enraizador, con un aumento del 9.82% (Figura 2). Estos resultados sugieren que la inoculación con rizobacterias, ya sea de forma individual o en combinación con el enraizador Radix, ejerce un efecto positivo sobre el peso del fruto. Esto se atribuye a una mejor disponibilidad de nutrientes y estimulación fisiológica del llenado de fruto, como en el trabajo de Gándara-Ledezma y Gutiérrez-Coronado (2023), que destacaron un aumento del 30% en peso de fruto aplicando consorcios bacterianos. Igualmente, en el trabajo de Soberanes-Pérez et al. (2020) se observaron aumentos de 5-20 g en higos bajo la aplicación de biorreguladores que pueden ser producidos por las PGPR, y Dong et al. (2023) que reportaron en tomate incrementos mayores al 42% con la aplicación de *Bacillus*.

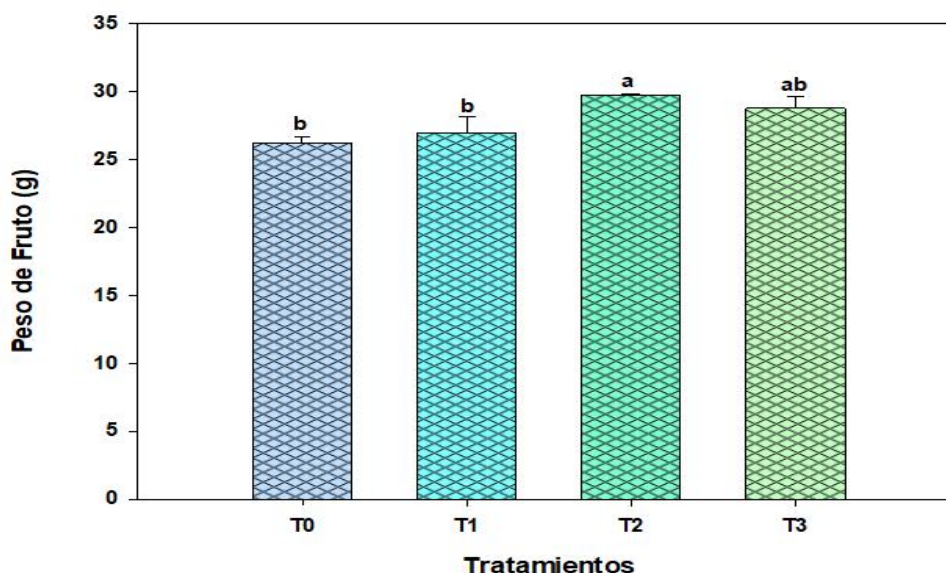


Figura 2. Peso de fruto (g).

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

Los tratamientos con *Pseudomonas* sp. solo, y su combinación con Radix se comportaron iguales, pero mostraron un DIE significativamente mayor que el control y al tratamiento con el enraizador Radix en un 6.39 y 5.75% respectivamente, lo cual sugiere que la rizobacteria mejora estructuras reproductivas al favorecer la absorción de nutrientes y la producción de fitohormonas, como las auxinas y citoquininas, que influyen directamente en la división y expansión celular (Egamberdieva et al., 2017; Calvo et al., 2014). Los resultados concuerdan con Gándara-Ledezma y Gutiérrez-Coronado (2023), pues también evidenciaron mejoras en el tamaño y peso de frutos de higo con consorcios microbianos compuesto por *P. fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* y *Trichoderma harzianum*.

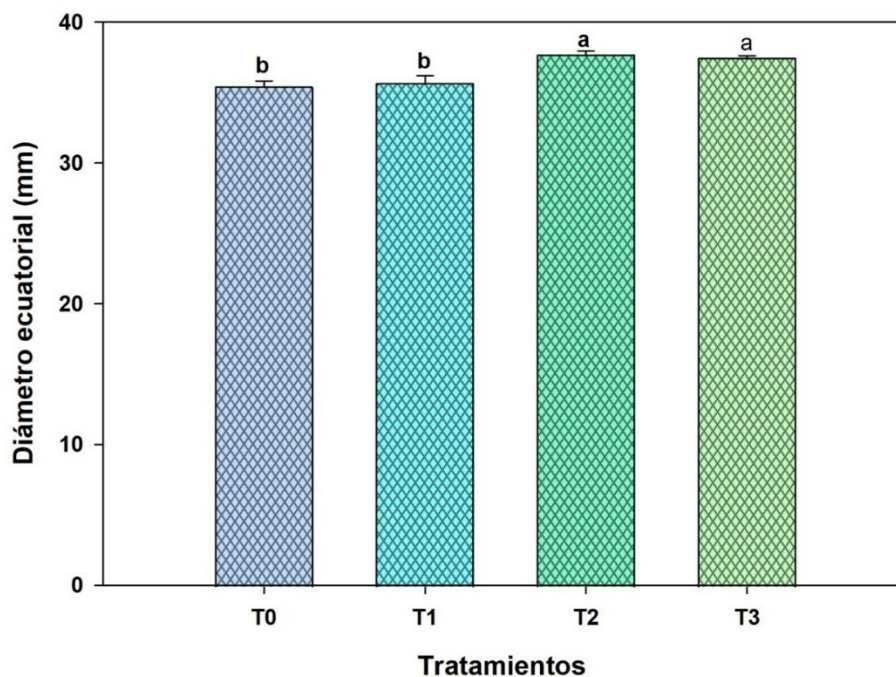


Figura 3. Diámetro ecuatorial (mm).

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

La inoculación con *Pseudomonas* sp. y en combinación con Radix, incrementó significativamente el DIP en 7.89 y 5.26% a comparación al control y al tratamiento solo con Radix. Esto refleja la influencia de la rizobacteria, que puede favorecer el desarrollo morfológico del fruto mediante la división y elongación celular. Los resultados concuerdan con Martínez et al. (2019), quienes observaron aumentos en tamaño de fruto de melón con *P. fluorescens* atribuida a una mejor absorción de N, P y Zn. Bona et al. (2015) también reportaron mayor producción y tamaño en frutos con *Pseudomonas* sp. y micorrizas en comparación con plantas no inoculadas.

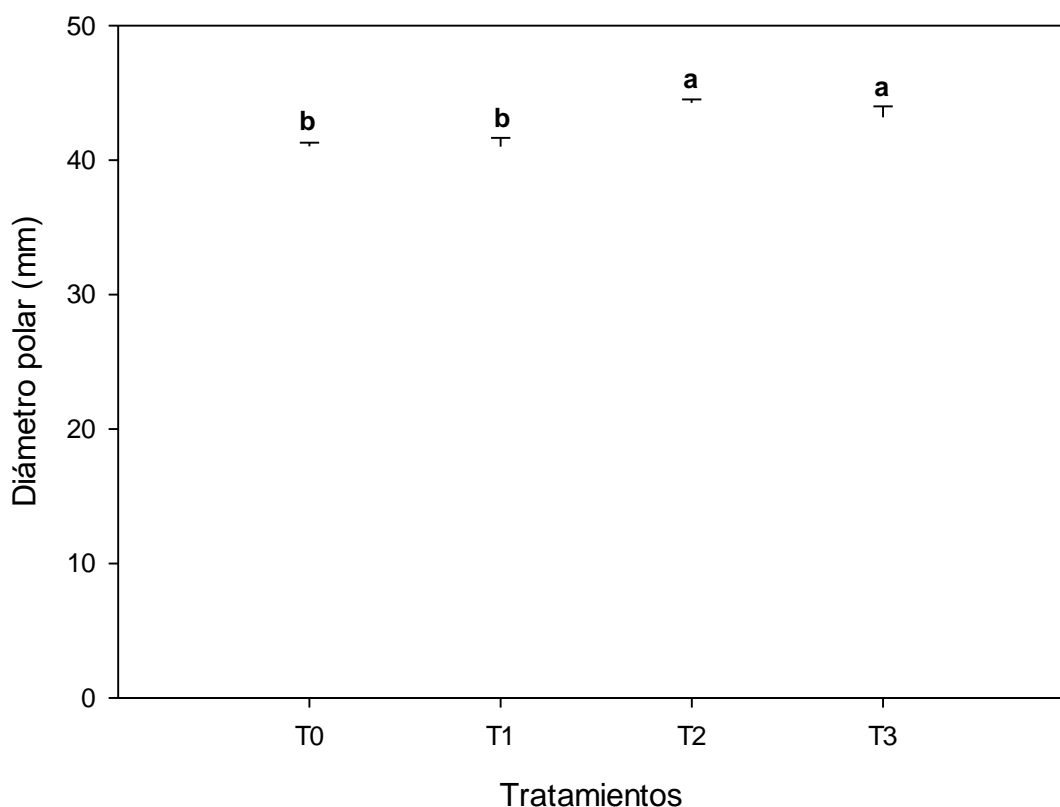


Figura 4. Diámetro polar (mm).

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

Los tratamientos con *Pseudomonas* sp. y Radix no presentaron diferencias significativas entre sí para la variable de SST; sin embargo, todos superaron significativamente al

control mostrando un incremento del 4.33, 3.94 y 6.59%, respectivamente, lo cual indica que dicha rizobacteria y el enraizador pueden incrementar su contenido de azúcares solubles, y se relaciona con una mejor nutrición, mayor actividad fotosintética y metabolismo del C (Calvo et al., 2014; Egamberdieva et al., 2017). Pii et al. (2018) observaron mayor dulzor en fresas con *Azospirillum brasilense* probablemente debido a una reducción en la concentración total de citrato, lo que incrementa la percepción de azúcares, mientras que Gashash et al. (2022) reportaron incrementos de hasta 26% en el contenido de SST en tomate, mejorando la calidad organoléptica del fruto.

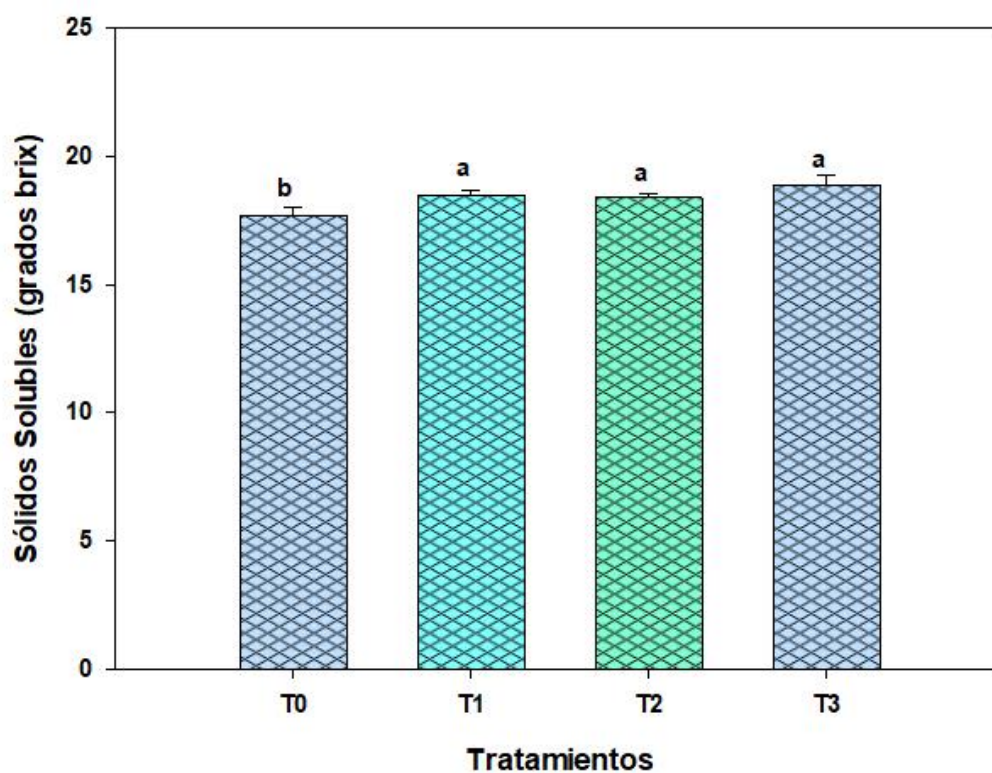


Figura 5. Sólidos solubles totales.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

El control presentó de 20.6 a 38% mayor contenido de ANT que los demás tratamientos. La reducción en estos últimos podría estar asociada a una menor exposición al estrés ambiental o fisiológico lo que a su vez refleja una mejor condición metabólica de las

plantas tratadas con *Pseudomonas* sp. o Radix. Y esto fue debido a que las PGPR, como *Pseudomonas* sp. pueden reducir el estrés en plantas al mejorar la absorción de nutrientes, inducir la producción de fitoalexinas, y aumentar la actividad antioxidante (Egamberdieva et al., 2017). Los resultados concuerdan con Zulueta-Rodríguez et al. (2014), que reportaron una reducción de hasta un 25% en el contenido de antocianinas en comparación con el control en plantas de flor de nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*) tratadas con cepas de *P. putida*. Las ANT, pertenecientes al grupo de los flavonoides, son pigmentos que aportan diferentes colores a las plantas y contribuyen a su defensa frente a distintos tipos de estrés ambiental, ayudando a neutralizar las especies reactivas de oxígeno (Li and Ahammed 2023). Estas acciones pueden mitigar condiciones adversas, lo que explicaría la menor concentración de antocianinas en los tratamientos con PGPR y Radix.

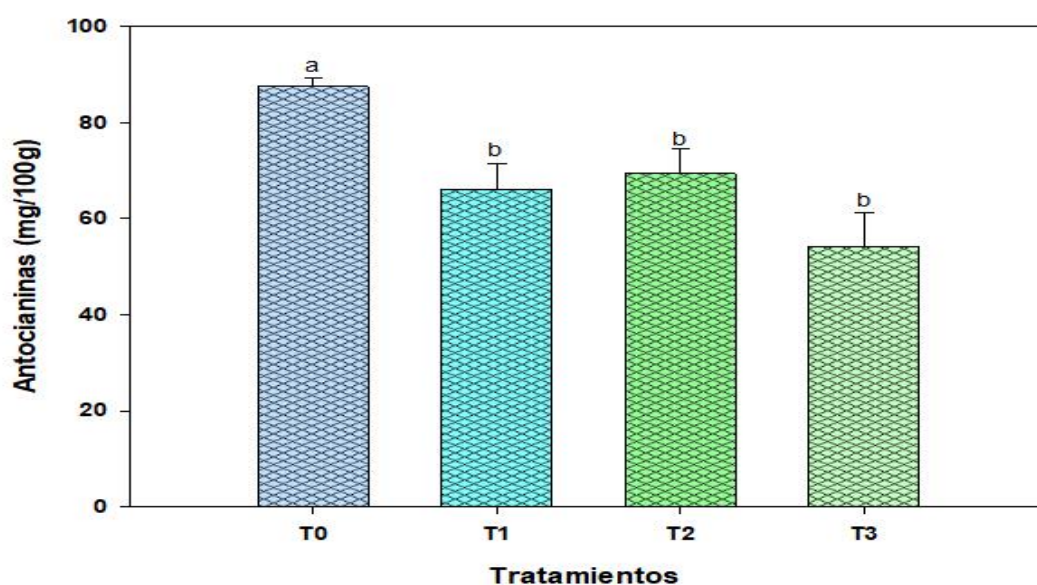


Figura 6. Antocianinas.

Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

El RFP fue 67.8% mayor al utilizar la mezcla de *Pseudomonas* sp. + Radix respecto al control, seguido de *Pseudomonas* sp por si sola superando al control con un 33%, el

tratamiento con Radix y el control estuvieron sin diferencia significativa. Garcia-Seco et al. (2015) reportaron un aumento significativo en el rendimiento de frutos en *Rubus* sp. tras la inoculación con *P. fluorescens* lo cual atribuyen a mejoras en el desarrollo vegetativo, floración y eficiencia fotosintética de la planta. Asimismo, Condori et al. (2024), y Altunlu et al. (2024) reportaron mejoras del 8-22% con PGPR en maíz y tomate bajo estrés. Chiquini-Medina et al. (2021) informaron un aumento del 32% en chile habanero con *Pseudomonas* sp., lo que coincide con los resultados del presente trabajo.

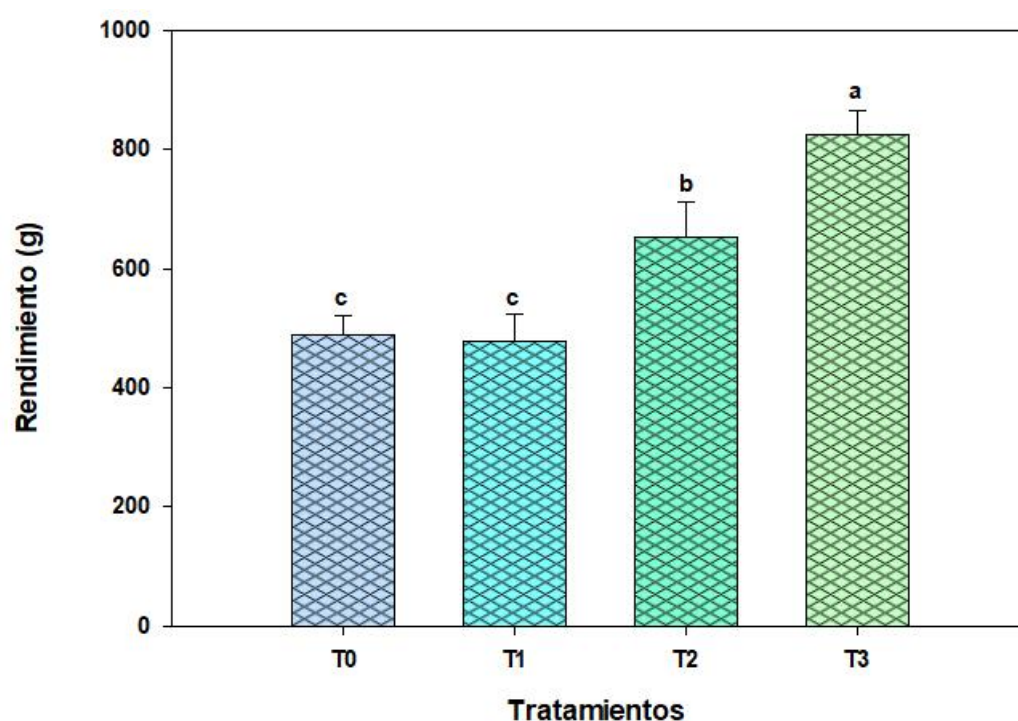


Figura 7. Rendimiento.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

Aunque no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en el contenido de N, donde se aplicó *Pseudomonas* sp. y su combinación con Radix se presentaron incrementos del 28.6% en comparación con el control, lo que sugiere una tendencia a

mejorar la absorción o asimilación de N por las plantas tratadas. Este resultado indica un posible efecto positivo de *Pseudomonas* sp. sobre la nutrición nitrogenada, aun sin alcanzar significancia. Los estudios como el de Li et al. (2021) demostraron que la inoculación con PGPR en maíz creció entre un 8.1 y 20.1% en condiciones de bajo N y P, gracias a una reestructuración beneficiosa de la comunidad rizosférica. De igual forma, El-Akhdar et al. (2025) observaron que el uso combinado de compost y PGPR mejoró significativamente el contenido de N en maíz bajo diferentes niveles de salinidad, lo que sugiere una mayor eficiencia de absorción en condiciones adversas.

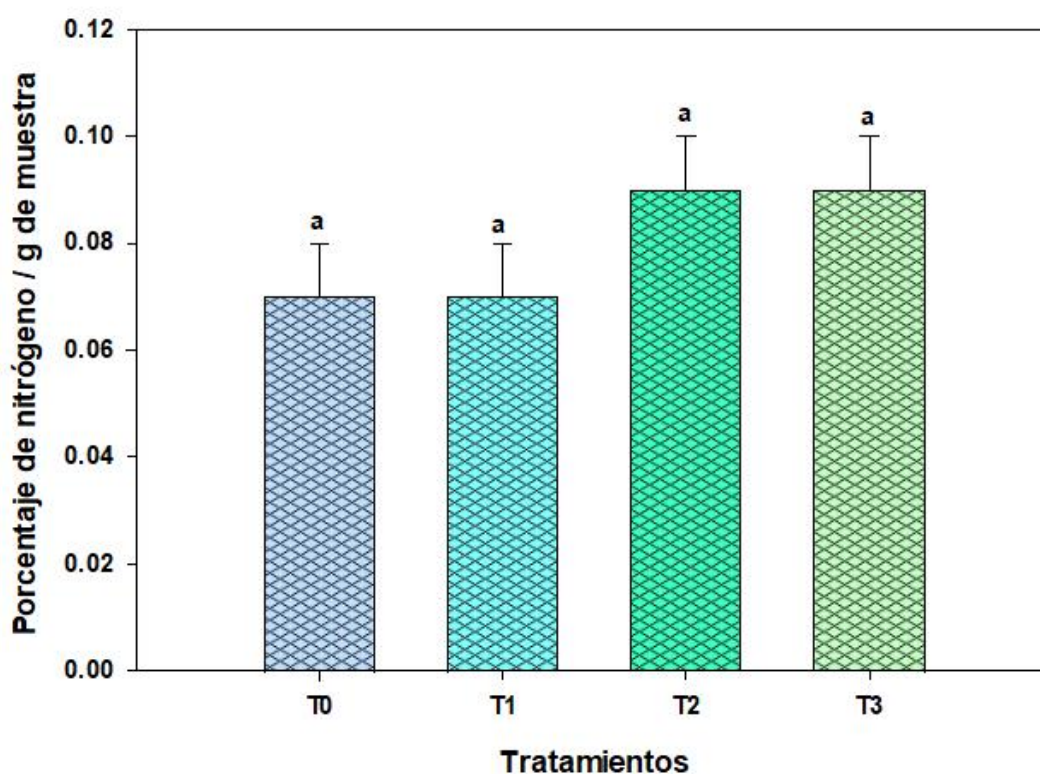


Figura 8. Porcentaje de nitrógeno por (g) de muestra.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

El tratamiento de *Pseudomonas* sp. + Radix aumenta el contenido de P, superando en un 14.58% al control. El tratamiento solo con *Pseudomonas* sp., presentó un aumento del 9.85%, mientras que solo Radix mostró un incremento del 8.75%, ambos también

superiores en número al control. Lo anterior respalda la eficacia de las PGPR para convertir fosfatos insolubles en formas asimilables, por ejemplo, Yadav et al. (2016) demostraron que *P. fluorescens*, solubiliza tricalcio fosfato, contribuyendo así a mejorar la disponibilidad de P. Rezakhani et al. (2019) mostraron que *Bacillus simplex* UT1 y *Pseudomonas* sp. FA1, combinado con silicio, mejoró significativamente la absorción de P en trigo, evidenciando aumentos notables en la eficiencia de uso de P, y optimiza su asimilación. Por lo que, los resultados podrían estar relacionados con una mayor actividad microbiana, y reflejarse en una mayor eficiencia nutricional en P del cultivo de higo, pues *Pseudomonas* produce ácidos orgánicos como gluconato y oxalato,

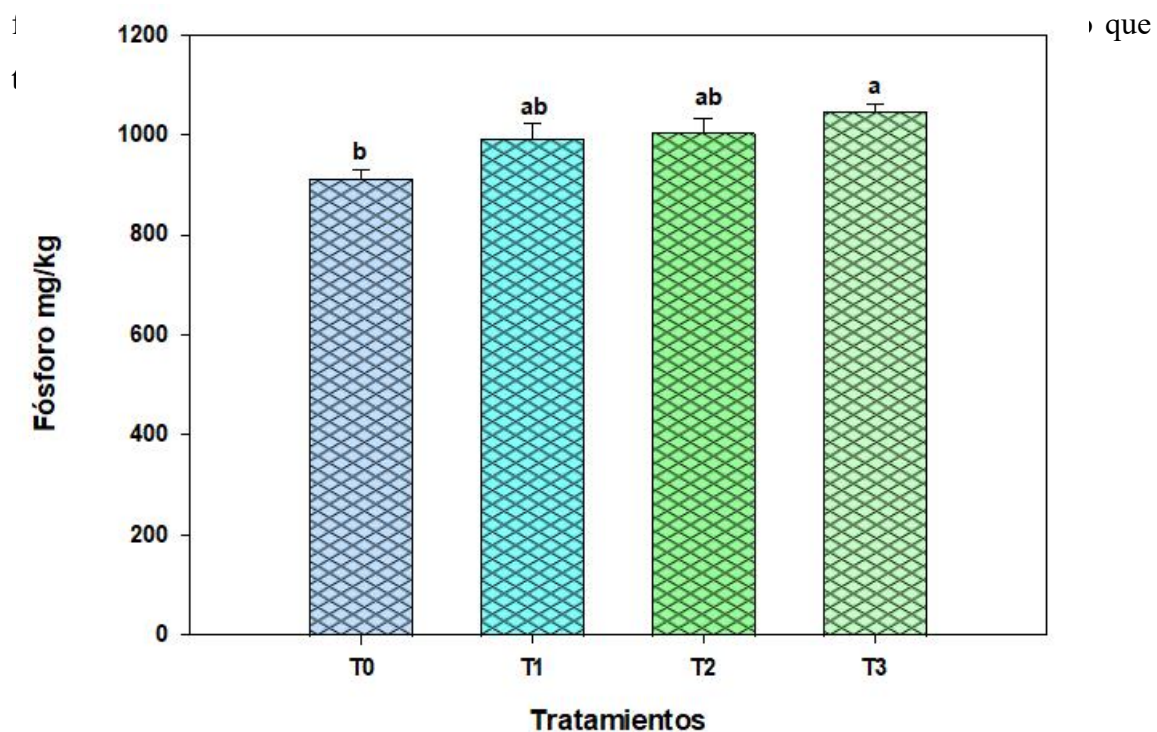


Figura 9. Fósforo.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

En cuanto a la concentración bacteriana hubo un incremento significativo en el tratamiento *Pseudomonas* sp. + Radix, superando en un 61.4% al control, de la misma forma, el tratamiento solo con *Pseudomonas* sp., mostró un aumento del 22% a comparación del control. Mientras que el tratamiento solo con Radix presentó un incremento del 15.4%, pero sin ser significativo. Esto es algo que indica una colonización bacteriana exitosa y persistente en la rizósfera, evidenciando una sinergia entre la rizobacteria y el producto comercial Radix. *Pseudomonas* sp. es reconocido por su capacidad para adherirse al sistema radical y formar biopelículas, lo que facilita la interacción beneficiosa con la planta huésped, lo cual coincide con observaciones de Ansari y Ahmad (2018), quienes demostraron en trigo que la formación de biopelículas por *P. entomophila* es una ventaja crucial para la colonización radicular. Asimismo, Pastor et al. (2023) observaron en jitomate que la inoculación con un consorcio microbiano de *Trichoderma harzianum* y *P. putida* modificó positivamente la estructura de la comunidad bacteriana del suelo, evidenciando incrementos en la densidad microbiana.

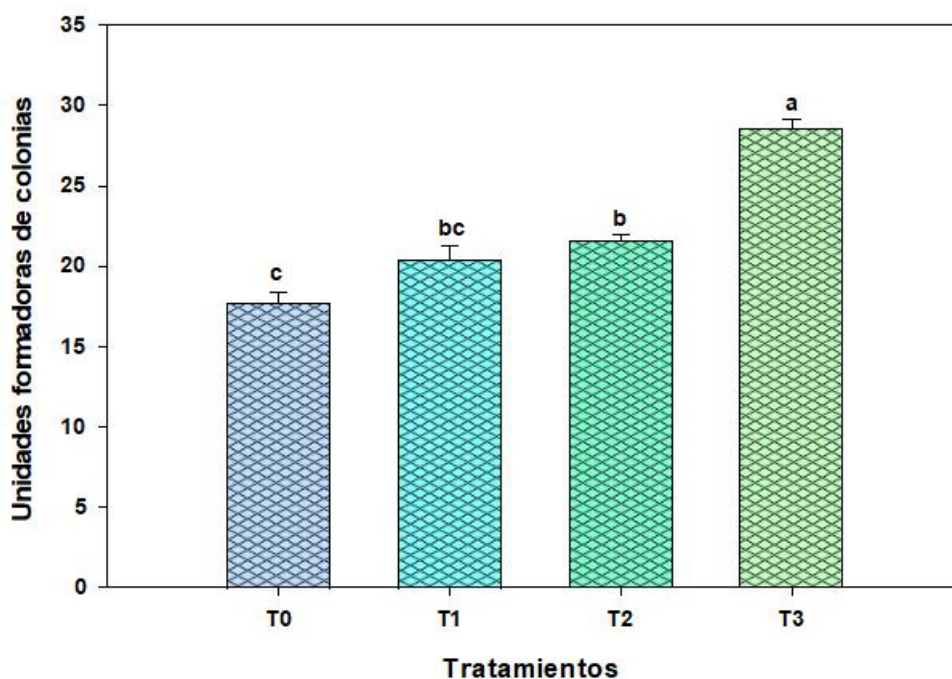


Figura 10. Unidades formadoras de colonias.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

La mejora de la longitud radicular con *Pseudomonas* sp. se alinea con hallazgos recientes que documentan que inoculantes del género *Pseudomonas* mejoran la arquitectura de raíces al modular respuestas hormonales y de absorción de nutrientes (Li et al., 2022); así como lo hacen en sistemas de trigo mediante colonización del rizosfera y mejoramiento del sistema radicular (Zhao et al., 2024). Estos mecanismos pueden incluir producción de auxinas, aumento de la absorción de nitrato y activación de genes de remodelación radicular (Trinh et al., 2018). En relación con el producto comercial RADIX 10000, aunque no se encontró en la revisión literatura pública un artículo con ese nombre exacto, el patrón observado es consistente con lo descrito para otros bioestimulantes que favorecen el enraizamiento mediante mayor disponibilidad de nutrientes o activación hormonal.

.

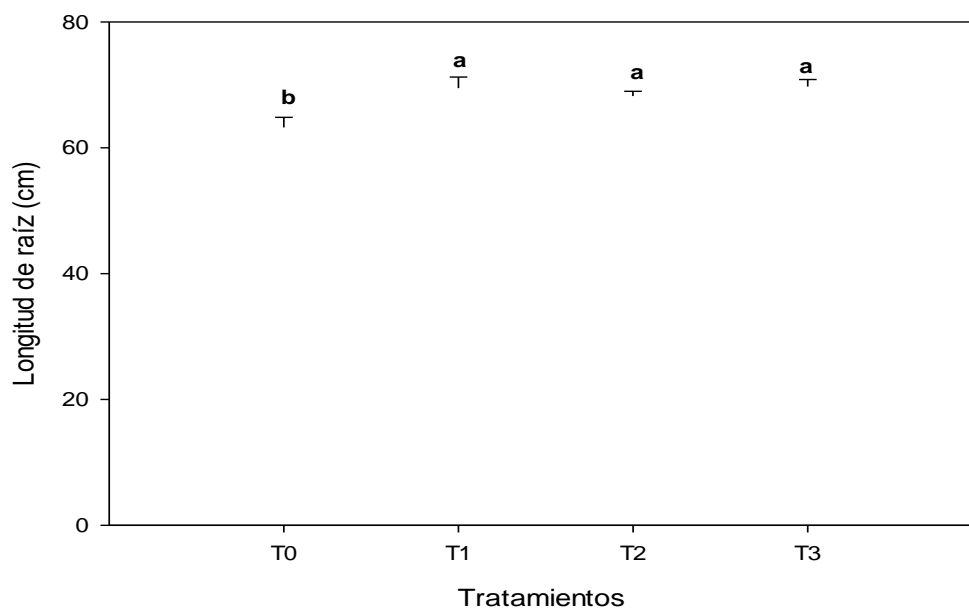


Figura 11. Longitud de raíz.

T0: Control. T1: Radix 10000. T2: *Pseudomonas* sp. T3: *Pseudomonas* sp.+ Radix 10000. Las barras superiores significan  $\pm$  error estándar Diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Duncan ( $p \leq 0.05$ ).

## CONCLUSIONES

La aplicación combinada de *Pseudomonas* sp. con el enraizador Radix promovió mejoras significativas en variables, bioquímicas y productivas del cultivo de higuera (*Ficus carica* L.). *Pseudomonas* sp. incrementó la longitud de raíz, el número, peso, diámetro polar y ecuatorial de frutos, el rendimiento total, así como los sólidos solubles totales. En cuanto al fósforo foliar, tanto Radix, *Pseudomonas* sp. como su combinación favorecieron su solubilización y absorción, además de incrementar la densidad microbiana en el suelo. El uso conjunto de *Pseudomonas* sp. y el enraizador Radix representa una estrategia biotecnológica sostenible para mejorar la productividad y calidad del cultivo de higo.

## REFERENCIAS

- Abdelnour, S. A., Abd El-Hack, M. E., Swelum, A. A., Perillo, A., & Losacco, C. (2018). The vital roles of boron in animal health and production: A comprehensive review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *50*, 296–304. doi:10.1016/j.jtemb.2018.07.018
- Agarwal, N., Upadhyay, P., & Tigadi, S. B. (2020). Biofortification to improve nutrition: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *9*, 763–779. doi:10.20546/ijcmas.2020.901.083
- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in plants: From acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 1–23. doi:10.3389/fpls.2020.00300
- Ali, M. R., Mehraj, H., & Jamal Uddin, A. F. M. (2015). Effects of foliar application of zinc and boron on growth and yield of summer tomato. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, *6*(01), 512–517. doi:10.18801/jbar.060115.61
- Arsic, M., Persson, D. P., Schjoerring, J. K., Thygesen, L. G., Lombi, E., Doolette, C. L., & Husted, S. (2022). Foliar-applied manganese and phosphorus in deficient barley: Linking absorption pathways and leaf nutrient status. *Physiologia Plantarum*, *174*(4), 1–15. doi:10.1111/ppl.13761
- Awal, M. A., Rashid, M. H. O., & Rahman, M. M. (2020). Effect of agronomic biofortification of sulphur and boron on the growth and yield of mustard (*Brassica campestris* L.) crop. *Asian Soil Research Journal*, *3*, 1–8. doi:10.9734/ASRJ/2020/v3i430077
- Bagale, S. (2021). Nutrient management for soybean crops. *International Journal of Agronomy*, *2021*, 1–9. doi:10.1155/2021/3304634
- Bai, Y., Sunarti, S., Kissoudis, C., Visser, R. G. F., & van der Linden, C. G. (2018). The role of tomato WRKY genes in plant responses to combined abiotic and biotic stresses. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 801. doi:10.3389/fpls.2018.00801
- Batista-Silva, W., Nascimento, V. L., Medeiros, D. B., Nunes-Nesi, A., Ribeiro, D. M., Zsögön, A., & Araújo, W. L. (2018). Modifications in organic acid profiles during fruit development and ripening: Correlation or causation? *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1–20. doi:10.3389/fpls.2018.01689

- Bender, D., & Schwarz, G. (2018). Nitrite-dependent nitric oxide synthesis by molybdenum enzymes. *FEBS Letters*, *592*(12), 1969–1982. doi:10.1002/1873-3468.13090
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *28*(4), 1327–1350. doi:10.1007/s11274-011-0979-9
- Bisht, R., Suyal, D. C., Singh, R., & Pandey, P. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria: Mechanisms and current prospective. *Journal of Fertilizer & Pesticides*, *9*(1), 1–7. doi:10.4172/2471-2728.1000216
- Biswas, J. C., Ladha, J. K., & Dazzo, F. B. (2000). Rhizobia inoculation improves nutrient uptake and growth of lowland rice. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(5), 1644–1650. doi:10.2136/sssaj2000.6451644x
- Bona, E., Cantamessa, S., Massa, N., Manassero, S., Marsano, F., Copetta, A., ... & Gamalero, E. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: A field study. *Mycorrhiza*, *27*(1), 1–11. doi:10.1007/s00572-016-0727-y
- Borriss, R. (2015). Bacillus, a plant-beneficial bacterium. *FEMS Microbiology Letters*, *37*(3), 123–148. doi:10.1093/femsre/fuv018
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, *383*(1–2), 3–41. doi:10.1007/s11104-014-2131-8
- Cao, Y., Zhang, Z., Ling, N., Yuan, Y., Zheng, X., Shen, B., & Shen, Q. (2011). Bacillus subtilis SQR 9 can control Fusarium wilt in cucumber by colonizing plant roots. *Biology and Fertility of Soils*, *47*(5), 495–506. doi:10.1007/s00374-011-0556-2
- Chaparro, J. M., Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2014). Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development. *ISME Journal*, *8*(4), 790–803. doi:10.1038/ismej.2013.196
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & Chauhan, R. (2017). Plant growth-promoting rhizobacteria: Potential candidates for sustainable agriculture. *Plant Biotechnology Journal*, *15*(7), 935–951. doi:10.1111/pbi.12724

- Chen, Y., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W. A., & Young, C. C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, *34*(1), 33–41. doi:10.1016/j.apsoil.2005.12.002
- Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(5), 669–678. doi:10.1016/j.soilbio.2009.11.024
- Conrath, U., Beckers, G. J. M., Langenbach, C. J. G., & Jaskiewicz, M. R. (2015). Priming for enhanced defense. *Annual Review of Phytopathology*, *53*, 97–119. doi:10.1146/annurev-phyto-080614-120132
- Copping, L. G., & Menn, J. J. (2000). Biopesticides: A review of their action, applications and future potential. *Pesticide Management Science*, *56*(8), 651–676. doi:10.1002/1526-4998(200008)56:8<651::AID-PS201>3.0.CO;2-U
- Dey, R., Pal, K. K., Bhatt, D. M., & Chauhan, S. M. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, *159*(4), 371–394. doi:10.1016/j.micres.2004.08.004
- Díaz-Zorita, M., Zorita, M. D., & Fernández-Canigia, M. V. (2012). Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *European Journal of Soil Biology*, *50*, 52–57. doi:10.1016/j.ejsobi.2011.12.005
- Dimkpa, C., Weinand, T., & Asch, F. (2009). Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant, Cell & Environment*, *32*(12), 1682–1694. doi:10.1111/j.1365-3040.2009.02028.x
- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2003). Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *22*(2), 107–149. doi:10.1080/713610853
- Drogué, B., Doré, H., Borland, S., Wisniewski-Dyé, F., & Prigent-Combaret, C. (2012). Which specificity in cooperation between phytostimulating rhizobacteria and plants? *Research in Microbiology*, *163*(6–7), 500–510. doi:10.1016/j.resmic.2012.08.006

- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Shurigin, V. V., Hashem, A., & Abd\_Allah, E. F. (2017). Endophytic bacteria improve plant growth, symbiotic performance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and induce suppression of root rot caused by *Fusarium solani* under salt stress. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 1887. doi:10.3389/fmicb.2017.01887
- Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *156*, 225–246. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.03.013
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, *2012*, 1–15. doi:10.6064/2012/963401
- Gopalakrishnan, S., Sathya, A., Vijayabharathi, R., Varshney, R. K., Gowda, C. L. L., & Krishnamurthy, L. (2015). Plant growth promoting rhizobia: Challenges and opportunities. *3 Biotech*, *5*(4), 355–377. doi:10.1007/s13205-014-0241-x
- Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Snehi, S. K., & Singh, V. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, *7*(2), 096–102. doi:10.4172/1948-5948.1000188
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review. *Annals of Microbiology*, *60*(4), 579–598. doi:10.1007/s13213-010-0117-1
- Hungria, M., Campo, R. J., Souza, E. M., & Pedrosa, F. O. (2010). Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*, *331*(1–2), 413–425. doi:10.1007/s11104-009-0262-0
- Illakkiam, D., Subramanian, P., & Sundaram, S. (2013). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on growth parameters of rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *2*(10), 181–189.
- Jetiyanon, K., & Kloepper, J. W. (2002). Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria for induction of systemic resistance against multiple plant diseases. *Biological Control*, *24*(3), 285–291. doi:10.1016/S1049-9644(02)00022-1

- Ji, S. H., Gururani, M. A., & Chun, S. C. (2014). Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic diazotrophic bacteria from Korean rice cultivars. *Microbiological Research*, 169(1), 83–98. doi:10.1016/j.micres.2013.06.003
- Khan, N., Bano, A., & Babar, M. A. (2019). The root growth of wheat plants, the water use efficiency and the role of PGPR under drought stress. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 272, 139–147. doi:10.1016/j.agee.2018.11.029
- Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria*, 2, 879–882.
- Kloepper, J. W., Leong, J., Teintze, M., & Schroth, M. N. (1980). Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, 286(5776), 885–886. doi:10.1038/286885a0
- Kuhl-Nagel, T., et al. (2022). Novel *Pseudomonas* sp. SCA7 promotes plant growth in vitro and in vivo: mechanistic insights and metabolite profiling. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 923515. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.923515>
- Li, Q., Su, Y., Chen, H., Xiong, L., Mi, G., et al. (2022). Plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas* sp. promotes root system architecture by activation of PLETHORA 3,5,7-dependent primed lateral pre-branch sites. *New Phytologist*, 236(1), 138-150. <https://doi.org/10.1111/nph.18199>
- Lucy, M., Reed, E., & Glick, B. R. (2004). Applications of free-living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86(1), 1–25. doi:10.1023/B:ANTO.0000024903.10757.6e
- Mahmood, A., Turgay, O. C., Farooq, M., & Hayat, R. (2016). Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: A review. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(8), fiw112. doi:10.1093/femsec/fiw112
- Malusa, E., Sas-Paszt, L., & Ciesielska, J. (2012). Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, 2012, 1–12. doi:10.1100/2012/491206

- Mantelin, S., & Touraine, B. (2004). Plant growth-promoting bacteria and nitrate availability: Impacts on root development and nitrate uptake. *Journal of Experimental Botany*, 55(394), 27–34. doi:10.1093/jxb/erh010
- Marasco, R., et al. (2024). Desert-adapted plant growth-promoting pseudomonads enhance root system architecture and plant tolerance to abiotic stress. *Environmental Microbiology*, 26(3), 70043. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.70043>
- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G., & Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293–319. doi:10.4067/S0718-95162010000100006
- Mishra, P. K., Mishra, S., Selvakumar, G., Bisht, S. C., Kundu, S., Bisht, J. K., & Gupta, H. S. (2009). Characterization of *Bacillus* strains isolated from rhizosphere of tea (*Camellia sinensis* L.) and their potential for plant growth promotion. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 19(5), 519–527. doi:10.4014/jmb.0812.730
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, 32(2), 429–448. doi:10.1016/j.biotechadv.2013.12.005
- Nihorimbere, V., Ongena, M., Smargiassi, M., & Thonart, P. (2011). Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 15(2), 327–337.
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197. doi:10.1007/s11274-017-2364-9
- Pérez-Montaño, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., López-Baena, F. J., Ollero, F. J., & Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiological Research*, 169(5–6), 325–336. doi:10.1016/j.micres.2013.09.011

- Pii, Y., Mimmo, T., Tomasi, N., Terzano, R., Cesco, S., & Crecchio, C. (2015). Microbial interactions in the rhizosphere: Beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. *A Review. Biology and Fertility of Soils*, *51*(4), 403–415. doi:10.1007/s00374-015-0996-1
- Rana, A., Saharan, B., Joshi, M., Prasanna, R., Kumar, K., & Nain, L. (2011). Identification of multi-trait PGPR isolates and evaluating their potential as inoculants for wheat. *Annals of Microbiology*, *61*(4), 893–900. doi:10.1007/s13213-011-0211-1
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, *321*(1–2), 305–339. doi:10.1007/s11104-009-9895-2
- Sah, S., Krishnani, S., & Singh, R. (2021). Pseudomonas mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*, *2*, 100084.
- Saharan, B. S., & Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, *21*, 1–30.
- Sarkar, A., Ghosh, P. K., Pramanik, K., Mitra, S., Soren, T., Pandey, S., Mondal, M. H., & Maiti, T. K. (2018). A halotolerant Enterobacter sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. *Microbiological Research*, *169*(7–8), 20–32. doi:10.1016/j.micres.2013.09.008
- Schwyn, B., & Neilands, J. B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, *160*(1), 47–56. doi:10.1016/0003-2697(87)90612-9
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, *2*, 587. doi:10.1186/2193-1801-2-587
- Singh, J. S., Pandey, V. C., & Singh, D. P. (2011). Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *140*(3–4), 339–353. doi:10.1016/j.agee.2011.01.017

- Somers, E., Vanderleyden, J., & Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere bacterial signalling: A love parade beneath our feet. *Critical Reviews in Microbiology*, *30*(4), 205–240. doi:10.1080/10408410490468786
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, *31*(4), 425–448. doi:10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x
- Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Khan, M. S. I., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, *121*, 102–117. doi:10.1016/j.apsoil.2017.09.030
- Tahir, M., Mirza, M. S., Hameed, S., Dimitrov, M. R., Smidt, H., & Sessitsch, A. (2017). Plant growth promotion by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolated from rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil*, *405*(1–2), 13–24. doi:10.1007/s11104-015-2527-7
- Tilak, K. V. B. R., Ranganayaki, N., Pal, K. K., De, R., Saxena, A. K., Nautiyal, C. S., Mittal, S., Tripathi, A. K., & Johri, B. N. (2005). Diversity of plant growth and soil health supporting bacteria. *Current Science*, *89*(1), 136–150.
- Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A. C. (2017). Perspectives and challenges of microbial application for crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 49. doi:10.3389/fpls.2017.00049
- Verma, J. P., Yadav, J., Tiwari, K. N., & Kumar, A. (2010). Effect of indigenous Mesorhizobium spp. and plant growth promoting rhizobacteria on yields and nutrients uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under sustainable agriculture. *Ecological Engineering*, *36*(2), 317–324. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.03.002
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, *255*(2), 571–586. doi:10.1023/A:1026037216893
- Wu, S. C., Cao, Z. H., Li, Z. G., Cheung, K. C., & Wong, M. H. (2005). Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial. *Geoderma*, *125*(1–2), 155–166. doi:10.1016/j.geoderma.2004.07.003

Zhao, G., et al. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture: focus on *Pseudomonas*, *Azotobacter* and *Bacillus*. *Agriculture & Food Security*, 13, Article [?].  
<https://doi.org/10.1007/s13580-023-00545-8>