

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Efectos de inoculación de bacterias nativas del Noreste de México en desarrollo, crecimiento y control de *Botrytis cinérea* en tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero

Por:

Wilder Madai Ortiz López

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Torreón Coahuila México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efectos de inoculación de bacterias nativas del Noreste de México en desarrollo, crecimiento y control de *Botrytis cinérea* en tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero

Por:

Wilder Madai Ortiz López

TESIS

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

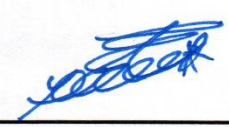
INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobada por:



Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Presidente


Dr. José Rafael Paredes Jácome
Vocal


Dr. Fabián García Espinoza
Vocal


Dr. Ricardo Ramírez Gottfried
Vocal Suplente


Coordinación de la División de Carreras Agronómicas

M.C. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

Torreón Coahuila México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Efectos de inoculación de bacterias nativas del Noreste de México en desarrollo, crecimiento y control de *Botrytis cinérea* en tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero

Por:

Wilder Madai Ortiz López

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobada por el Comité de Asesoría:



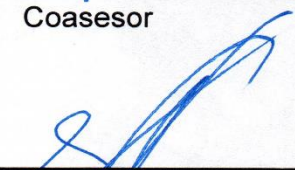
Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Asesor Principal



Dr. José Rafael Paredes Jácome
Coasesor



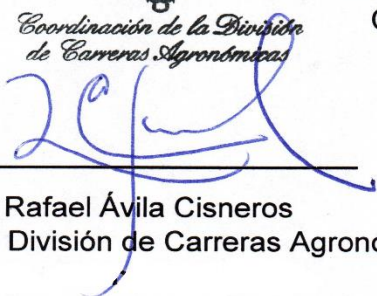
Dr. Fabián García Espinoza
Coasesor



Dr. Ricardo Ramírez Gottfried
Coasesor



*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*



M.C. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

Torreón Coahuila México
Junio 2026

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo con todo mi corazón a mis **padres Rolfi Ortiz M. y Lucia Noelinda López**, quienes me han dado el ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia en cada etapa de mi vida. A mis hermanos **Noelmi Ortiz, Rolfi Ortiz, Henry Ortiz Keny Ortiz Y también Andrea A. García**, por su compañía, apoyo y por ser siempre una fuente de motivación y fortaleza.

Extiendo también esta dedicatoria a toda mi familia en general, que con su cariño y respaldo me han acompañado en este camino académico. Cada logro aquí alcanzado es también suyo, porque sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

Con gratitud y amor, les ofrezco esta tesis como reflejo de su influencia en mi vida y como un homenaje a todo lo que hemos compartido.

AGRADECIMIENTOS

Con profundo cariño y gratitud, quiero expresar mi agradecimiento a mis padres **Rolfi Ortiz M.** y **Lucia Noelinda López**, quienes han sido mi ejemplo de esfuerzo, perseverancia y amor incondicional. A mis hermanos **Noelmi Ortiz, Rolfi A. Ortiz, Henry Ortiz y Keny Ortiz**, por su compañía, apoyo constante y por ser siempre una fuente de motivación en este camino académico.

Extiendo este agradecimiento a toda mi **familia en general en especial a la familia Ortiz a la igual familia López**, incluyendo a mis abuelos, tíos y primos, quienes con su cariño y respaldo me han acompañado en cada etapa de mi formación.

De manera especial, agradezco a Andrea **R. Alonzo** por su amistad, cariño, apoyo y palabras de aliento en los momentos más importantes de este proceso.

De manera muy especial, agradezco a mis asesores: **Dr. Rafael Paredes Jácome, Dr. Abraham Chaparro Encinas, Dr. Fabián García Espinosa y Dr. Ricardo R. Gottfried**, por su guía, conocimientos, críticas constructivas y confianza depositada en mí. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento profesional y personal.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro y por ayudarme a convertirlo en una realidad.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN.....	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
HIPÓTESIS.....	3
2. Introducción al cultivo de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	4
2.1.1 Importancia económica, nutricional y agroindustrial del tomate en México .	4
2.1.2 Requerimientos fisiológicos y condiciones óptimas en invernadero	5
2.1.3 Principales limitantes bióticas: enfermedades fúngicas, especialmente <i>Botrytis cinérea</i> 6	
2.1.4 Ciclo de vida, mecanismos de infección y factores predisponentes	7
2.2 <i>Botrytis cinérea</i> : agente causal de la pudrición gris	8
2.2.1 Ciclo de vida, mecanismos de infección y factores predisponentes	8
2.2.2 Síntomas característicos en tomate: incidencia y severidad	9
2.2.3 Impacto en rendimiento y calidad del fruto	10
2.2.4 Estrategias convencionales de manejo y sus limitaciones	11
2.3. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR).....	12
2.3.1 Definición y clasificación funcional	12
2.3.2 Mecanismos de acción.....	12
2.3.3 Evidencias de actividad antifúngica frente a <i>Botrytis cinerea</i>	13
2.3.4 Aplicaciones en cultivos hortícolas bajo condiciones protegidas	14
2.4. Bacterias nativas del noreste de México como bioinsumos	14
2.4.1 Justificación territorial y adaptación agroecológica	14
2.4.2 Potencial biotecnológico en el manejo integrado de enfermedades	15
2.4.3 Estudios previos en tomate y otros cultivos regionales	16
2.4.4 Ventajas frente a cepas comerciales: resiliencia, compatibilidad y soberanía científica.....	17
3. MATERIALES Y METODOS.....	19

3.1 Ubicación del experimento	19
3.2 Material vegetal y siembra	19
Material vegetal	19
Siembra en charolas.....	19
Llenado de macetas	19
Trasplante.....	20
3.3 Material microbiológico	20
Preparación de inóculo	20
Aplicación de las bacterias a las plantas	21
Sistema de producción.....	21
Preparación del patógeno (<i>Botrytis cinerea</i>):.....	21
Reactivación del patógeno.....	21
Preparación del inóculo	21
Aplicación al cultivo	22
3.5 Manejo del cultivo	22
Tutorado	22
Fertilización	23
Poda de hojas y brotes axilares	23
Control de plagas y enfermedades	23
3.6 Descripción de los tratamientos	24
Análisis estadístico.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1 Variables morfológicas	27
4.2 Efecto de la inoculación sobre el rendimiento del tomate (peso, número de frutos, calidad)	29
Incidencia y severidad de la enfermedad de <i>Botrytis cinerea</i>	36
5. CONCLUSIONES.....	39
6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los productos químicos utilizados para control de plagas ...	24
Tabla 2. Descripción de los tratamientos evaluados	24
Tabla 3. Resultados obtenidos en las variables morfométricas	28
Tabla 4. Resultados obtenidos en las variables de calidad en tomate	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. contenido promedio de vitamina c (mg/100 g) en frutos de tomate tratados con las cepas.	30
Figura 2. Firmeza (Kg) promedio ($\pm$ error estándar) de frutos de tomate inoculados con cepas y tratamiento control.	31
Figura 3. Rendimiento promedio ($\pm$ error estándar) de frutos de tomate (g) en tratamientos con cepas y tratamiento control.	33
Figura 4. Número promedio de frutos por planta ($\pm$ error estándar) en tratamientos con cepas y el control.	34
Figura 5. Severidad de infección por botrytis cinerea en la zona inoculada de plantas de tomate tratadas con diferentes cepas (n = 5 por tratamiento).	38

RESUMEN

El presente trabajo evaluó el potencial biotecnológico de bacterias nativas aisladas en el Noreste de México como bioinoculantes para el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en condiciones de invernadero. Se caracterizó su capacidad para promover el desarrollo y crecimiento vegetal, así como su efecto antagónico frente al hongo necrotrófico *Botrytis cinerea*, agente causal del moho gris. Mediante ensayos bajo condiciones controladas se determinó el impacto de la inoculación bacteriana en variables agronómicas (altura, biomasa, área foliar), productivas (peso y número de frutos) y de calidad (vitamina C, firmeza, °Brix, diámetros), además de su efecto sobre la incidencia y severidad de la enfermedad, proponiendo una alternativa sustentable para reducir el uso de agroquímicos y mitigar los riesgos de resistencia fúngica.

Las PGPR nativas demostraron ventajas operativas y ecológicas: mejor adaptación a condiciones edafoclimáticas locales, mayor capacidad de colonización rizosférica y diversidad funcional (mecanismos nutricionales, producción de fitohormonas, sideróforos, antibiosis e inducción de ISR). La especificidad de respuesta entre cepas sugiere que la selección de bioinoculantes debe orientarse según objetivos productivos (rendimiento, calidad nutracéutica o control de enfermedades) y validarse en distintas temporadas y escalas.

En conjunto, la tesis aporta evidencia de que las bacterias nativas del Noreste de México son candidatas prometedoras como bioinsumos sostenibles para la producción de tomate en invernadero, capaces de aumentar productividad, mejorar atributos de calidad y reducir la severidad de *Botrytis cinerea*, contribuyendo a estrategias de manejo integrado que disminuyan la dependencia de agroquímicos.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, PGPR, *Botrytis cinerea*, Resistencia sistémica inducida, Bioinsumos, Agricultura sostenible

1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), originario de América, es una especie herbácea perteneciente a la familia Solanaceae con hábito de crecimiento rastrero. Su fruto se distingue por el elevado contenido de agua y su aporte nutricional, ya que proporciona vitaminas A y C, carbohidratos y minerales como potasio, fósforo y magnesio. (Palomo et al., 2010).

el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) que es la hortaliza que ocupa el primer lugar en producción mundial y el segundo lugar en superficie sembrada. China es el principal productor con 67.636.724,8 t en 2021; en América Latina y el Caribe, Colombia ocupa el quinto lugar con 875.436,86 t, después de México, Brasil, Argentina y Chile (FAOSTAT, 2023).

El liderazgo del jitomate mexicano en las exportaciones mundiales se explica, entre otros factores, por su alta competitividad frente a otros países, especialmente en el mercado estadounidense, que constituye uno de los principales destinos de importación y en 2021 concentró el 23.56% del total. (FAOSTAT, 2023).

Según lo señalado por Perilla et al. (2011), el cultivo de tomate en invernadero tiene como propósito disminuir la dependencia de las condiciones climáticas externas, facilitar la programación de las cosechas, mejorar la calidad de los frutos y reducir la incidencia de plagas y enfermedades

En México, el cultivo de tomate posee una relevancia destacada, ya que cerca del 70% de la producción bajo sistemas protegidos corresponde a esta hortaliza. Por ello, resulta fundamental implementar un manejo eficiente en la agricultura intensiva, lo cual exige comprender los factores que determinan el potencial productivo de los cultivos. (Juárez-Maldonado et al., 2017).

Uno de los tantos desafíos que enfrenta el cultivo del tomate es el del moho gris, una enfermedad necrotizada causada *Botrytis cinerea* (Li et al., 2023; Roşca et al., 2023).

Botrytis cinerea se reconoce como uno de los patógenos fúngicos de mayor relevancia científica y económica, ocupando el segundo lugar en importancia a nivel mundial. Este hongo presenta una amplia capacidad de infección, afectando más de 200 especies vegetales y ocasionando pérdidas económicas globales estimadas en más de 10 mil millones de dólares (Dean et al., 2012; Tian et al., 2023).

Ante estos desafíos, Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) son clave en la agricultura sostenible. Frente a la necesidad de aumentar la producción reduciendo fertilizantes y pesticidas sintéticos, las PGPR constituyen una alternativa ecológica que mejora el rendimiento de los cultivos mediante mecanismos directos e indirectos (Vejan et al., 2016).

Para lograr una agricultura sostenible, es necesario desarrollar cultivos con mayor resistencia a patógenos, tolerancia a salinidad y sequía, capacidad de afrontar estrés por metales pesados y mejor perfil nutricional. Para conferir estas propiedades, se puede recurrir a microorganismos edáficos (bacterias, hongos, algas) que incrementan la absorción de nutrientes y optimizan el uso del agua (Armanda et al., 2014).

Dentro de los microorganismos del suelo, las bacterias litosféricas promotoras del crecimiento (PGPR) muestran el mayor potencial. Estas bacterias pueden utilizarse para fortalecer la salud de las plantas y potenciar su crecimiento, constituyendo una estrategia de manejo libre de contaminantes (Calvo et al., 2014).

La efectividad de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal requiere que las cepas sobrevivan en el medio edáfico, sean compatibles con la planta hospedante, se integren o interactúen favorablemente con la microflora nativa y toleren las variables ambientales.

Un PGPR ideal debe colonizar eficazmente la rizosfera, estimular el crecimiento de la planta, actuar sobre múltiples objetivos, ser inocuo para el medio ambiente, convivir con otras rizobacterias y resistir calor, radiación UV y oxidantes.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la inoculación de cepas bacterianas nativas del noroeste de México sobre el desarrollo, rendimiento y resistencia de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero, mediante la caracterización de variables morfométricas y fitopatológicas frente a *Botrytis cinérea*.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar el impacto de las cepas bacterianas en variables fenológicas del cultivo, como floración y fructificación.
- Determinar el efecto de la inoculación sobre el rendimiento del tomate (peso, número de frutos, calidad)
- Evaluar la resistencia inducida frente a *Botrytis cinérea* mediante la caracterización de variables fitopatológicas (incidencia, severidad, síntomas).
- Comparar los resultados obtenidos con los tratamientos control (sin inoculación) y convencional (químico), para establecer la eficacia de las cepas bacterianas.

HIPÓTESIS

La inoculación de cepas bacterianas nativas del noroeste de México mejora el desarrollo, rendimiento y resistencia de plantas de tomate frente a *Botrytis cinérea* bajo condiciones de invernadero.

2. Introducción al cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*)

2.1.1 Importancia económica, nutricional y agroindustrial del tomate en México

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los cultivos hortícolas más relevantes en México, tanto por su volumen de producción como por su valor comercial. Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2023) México se ha consolidado como uno de los principales productores y exportadores de tomate a nivel mundial, con una producción anual superior a los tres millones de toneladas. Entre las regiones más destacadas en este cultivo se encuentran Sinaloa, Baja California, Michoacán y San Luis Potosí, donde predominan los sistemas protegidos como invernaderos y mallas sombra) (SIAP 2023).

Desde el punto de vista nutricional, el tomate representa una fuente relevante de compuestos bioactivos, entre ellos el licopeno, un carotenoide con propiedades antioxidantes vinculado a la prevención de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Asimismo, aporta vitaminas A, C y E, minerales como potasio, fósforo y magnesio, además de fibra dietética, lo que lo convierte en un alimento funcional de gran valor para la salud humana (Martínez-Valverde 2022).

En el sector agroindustrial, el tomate presenta una notable diversidad de aplicaciones, ya que puede procesarse en purés, salsas, jugos, concentrados y productos enlatados, lo que incrementa su valor agregado y prolonga su vida útil. Esta versatilidad ha favorecido la consolidación de cadenas productivas regionales y la generación de empleo en áreas rurales y periurbanas. La demanda constante en los mercados nacional e internacional ha impulsado la incorporación de tecnologías de producción intensiva, como el cultivo en invernadero, que permite un mayor control de las condiciones ambientales, disminuye riesgos fitosanitarios y mejora la calidad del fruto (FAO 2020).

2.1.2 Requerimientos fisiológicos y condiciones óptimas en invernadero

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una especie de clima cálido que alcanza su mejor desarrollo bajo condiciones ambientales controladas. Factores como temperatura, humedad, radiación solar, ventilación, nutrición mineral y calidad del sustrato determinan su crecimiento. En sistemas de invernadero, estos parámetros pueden regularse para optimizar rendimiento y calidad. El rango térmico ideal para la fase vegetativa es de 20–25 °C durante el día y 15–18 °C por la noche; temperaturas superiores a 30 °C afectan la polinización y el cuajado, mientras que valores menores a 10 °C ralentizan el metabolismo y generan estrés fisiológico (Blog Agricultura, 2026; Infoagro, s.f.).

También (Infoagro, s.f.2026) indica que la humedad relativa óptima se sitúa entre 60 % y 70 %; niveles más altos favorecen el desarrollo de enfermedades fúngicas como *Botrytis cinerea*, mientras que niveles bajos pueden provocar deshidratación y estrés hídrico.

La radiación solar constituye un factor esencial para la fotosíntesis y la acumulación de biomasa. En sistemas de invernadero se recomienda mantener una intensidad lumínica mínima de 400–600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, complementada con iluminación artificial en aquellas zonas donde la radiación natural resulta insuficiente (FAO 2019).

Igualmente, Estudios recientes en microclima de invernaderos Mesmoudi et al., 2017; Baxevanou et al., 2018 señalan que la ventilación natural y forzada es clave para regular temperatura interna, reducir humedad relativa y prevenir enfermedades fúngicas como *Botrytis cinerea*.

Estudios recientes como los de Bastías (2016) señala que un aporte equilibrado de macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio es fundamental para asegurar el crecimiento y la calidad del tomate en sistemas protegidos. De manera complementaria, García-López (2023) resalta que el uso de sustratos orgánicos y la interacción con PGPR mejoran la absorción de nutrientes, disminuyen la dependencia de fertilizantes químicos y favorecen una producción más sostenible.

2.1.3 Principales limitantes bióticas: enfermedades fúngicas, especialmente *Botrytis cinerea*

El tomate cultivado en invernadero enfrenta diversas limitaciones de origen biótico que afectan su desarrollo, rendimiento y calidad. Entre ellas, las enfermedades fúngicas representan uno de los principales problemas, ya que condiciones como alta humedad, temperatura y densidad de plantas favorecen la propagación de patógenos. Los hongos más comunes en este cultivo incluyen *Alternaria solani* (tizón temprano), *Fusarium oxysporum* (marchitez vascular), *Phytophthora infestans* (tizón tardío) y *Botrytis cinerea* (pudrición gris) (FAO 2019).

Botrytis cinerea es un hongo necrotrófico con un amplio rango de hospedantes, entre ellos el tomate, donde puede afectar hojas, flores, tallos y frutos en distintas fases de desarrollo (Williamson et al., 2007). El hongo se propaga principalmente mediante conidias transportadas por el aire, las cuales germinan en superficies húmedas favorecidas por condensación o riego por aspersión (Fillinger & Elad, 2016).

En sistemas protegidos, la elevada densidad de plantas junto con el exceso de humedad favorece la aparición de infecciones, especialmente en tejidos dañados o senescentes (Martínez-Ferri et al., 2018). También la resistencia que han desarrollado diversas cepas de *Botrytis cinerea* frente a fungicidas de uso común, como los inhibidores de la biosíntesis de esteroides y las anilino-pirimidinas, ha complicado significativamente su control (Fernández-Ortuño et al., 2015; De Miccolis Angelini et al., 2020).

Por ello, se sugiere adoptar estrategias integradas de manejo que combinen prácticas culturales —como ventilación adecuada, poda sanitaria y control del riego— con el uso de agentes de control biológico, tales como *Trichoderma harzianum* o *Bacillus subtilis*, además de la rotación planificada de fungicidas con distintos modos de acción (López-Pérez et al., 2019; Poveda, 2021). Este enfoque reduce la presión de selección y mejora la sostenibilidad del manejo fitosanitario en cultivos de tomate bajo invernadero.

2.1.4 Ciclo de vida, mecanismos de infección y factores predisponentes

Botrytis cinerea es un hongo fitopatógeno necrotrófico responsable de la pudrición gris en más de 200 especies vegetales, incluido el tomate (*Solanum lycopersicum*). Su ciclo de vida comprende una fase asexual, caracterizada por la producción de conidios, y una fase sexual denominada *Botryotinia fuckeliana*, aunque esta última se presenta con menor frecuencia en condiciones agrícolas (ECAMED 2024)

El proceso de infección comienza con la germinación de los conidios sobre tejidos vegetales húmedos. El hongo penetra a través de heridas, estomas o áreas senescentes, empleando enzimas como celulasas, pectinasas y proteasas para degradar la pared celular de la planta (Benito, Arranz & Eslava, 2000).

Una vez establecido, el hongo desarrolla micelio y estructuras reproductivas que facilitan su diseminación y permanencia en el ambiente. Además, *Botrytis cinerea* puede mantenerse como saprófito en restos vegetales, lo que favorece su recurrencia en ciclos sucesivos de cultivo (ECAMED 2024).

Los factores que predisponen a la infección en invernaderos incluyen una humedad relativa elevada (superior al 90 %), temperaturas moderadas entre 15 y 23 °C, baja radiación solar y una ventilación deficiente (Pavone 2021).

Según Benito, Arranz & Eslava, 2000 Estas condiciones favorecen la germinación de esporas y la colonización de los tejidos, especialmente durante las fases reproductivas, cuando flores y frutos son más susceptibles. Asimismo, el estrés fisiológico provocado por deficiencias nutricionales o daños mecánicos incrementa la vulnerabilidad de la planta frente al patógeno.

2.2 *Botrytis cinerea*: agente causal de la pudrición gris

2.2.1 Ciclo de vida, mecanismos de infección y factores predisponentes

Botrytis cinerea es un hongo necrotrófico ampliamente distribuido que ocasiona pudrición gris en más de 200 especies vegetales, incluido el tomate (*Solanum lycopersicum*). Su ciclo de vida comprende una fase asexual caracterizada por la producción de conidios, los cuales germinan en ambientes con alta humedad y temperaturas moderadas. En condiciones adversas, el patógeno forma esclerocios, estructuras de resistencia que le permiten sobrevivir en restos vegetales y reiniciar la infección en la siguiente temporada (Williamson et al., 2007).

Botrytis cinerea es un hongo necrotrófico de gran importancia a nivel mundial, capaz de afectar una amplia diversidad de especies vegetales, entre ellas el tomate (*Solanum lycopersicum*). Su ciclo de vida se basa en la producción de conidios asexuales, que germinan en condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas, favoreciendo la colonización de los tejidos. En ambientes adversos, el patógeno forma esclerocios, estructuras de resistencia que le permiten sobrevivir en restos vegetales y garantizar la continuidad del inóculo para iniciar nuevas infecciones en ciclos productivos posteriores (AbuQamar et al., 2016; Li et al., 2018). Una vez establecido, desarrolla micelio y produce nuevas estructuras reproductivas que aseguran su dispersión.

La alta incidencia de la pudrición gris en el tomate se explica por el microclima típico de los invernaderos, donde prevalecen humedades relativas elevadas y temperaturas templadas

. De acuerdo con (Elad et al. 2016), la falta de ventilación y el humedecimiento foliar actúan como detonantes epidemiológicos. A esto se suma el estado fisiológico de la planta; si esta presenta daños por labores culturales o carencias de nutrientes, su capacidad de defensa disminuye, facilitando el establecimiento de la enfermedad.

El conocimiento de estos mecanismos es esencial para diseñar estrategias de manejo integrado que reduzcan la presión del patógeno y favorezcan la acción de microorganismos benéficos como las PGPR, capaces de inducir resistencia sistémica en la planta (Romanazzi et al., 2016).

2.2.2 Síntomas característicos en tomate: incidencia y severidad

La pudrición gris ocasionada por *Botrytis cinerea* puede manifestarse en distintos órganos de la planta de tomate. En las hojas, los síntomas iniciales aparecen como manchas acuosas que evolucionan hacia lesiones necróticas de color marrón, generalmente localizadas en los márgenes o en zonas de contacto con otras estructuras vegetales (PortalFruticola.com, 2022). En los tallos, se presentan necrosis, colapso de tejidos y la aparición de micelio grisáceo, especialmente en áreas dañadas o expuestas a elevada humedad (Agrospec, 2025)

En las flores, la infección puede ocasionar aborto floral y caída prematura, reduciendo el número de frutos cuajados. En los frutos, la pudrición gris se manifiesta como una descomposición blanda de tonalidad marrón clara, acompañada por el desarrollo superficial de micelio gris y abundante esporulación, lo que facilita la dispersión del patógeno (Idema, 2024). Estos síntomas se intensifican bajo condiciones de elevada humedad relativa (>90 %) y temperaturas moderadas (18–23 °C), características de invernaderos con deficiente ventilación (Idema. 2024)

La incidencia de *Botrytis cinerea* puede superar el 40 % en cultivos sin un manejo adecuado, mientras que la severidad de la enfermedad está determinada por factores como la etapa fenológica de la planta, la densidad del follaje y la susceptibilidad genética del cultivar (Williamson et al., 2007). En sistemas intensivos, esta patología constituye una de las principales causas de pérdidas económicas, tanto por la disminución del rendimiento como por el rechazo comercial de frutos afectados.

2.2.3 Impacto en rendimiento y calidad del fruto

La pudrición gris causada por *Botrytis cinerea* constituye una de las principales limitantes en la producción de tomate bajo condiciones de invernadero. En ausencia de un manejo adecuado, las pérdidas pueden alcanzar hasta el 50 % del rendimiento comercializable, debido a la elevada incidencia y severidad de la enfermedad. (PortalFruticola.com, 2022)

En términos de calidad, los frutos afectados presentan una pudrición blanda acompañada de colapso tisular y crecimiento superficial de micelio gris, lo que disminuye su firmeza y acorta la vida de anaquel. Asimismo, se observa una reducción en los grados Brix y un deterioro en la apariencia visual, factores clave para su aceptación en los mercados de exportación (Herbario Fitopatología FAUBA, 2024)

Bastidas et al., (2017) menciona que este es un hongo polífago de gran relevancia económica en el cultivo de tomate, Su control químico requiere aplicaciones repetidas de fungicidas como fludioxonil, ciprodonil, clorotalonil, captan y fenhexamid. Sin embargo, las nuevas normativas y la creciente demanda de productos libres de residuos incrementan los costos de producción y obligan a implementar estrategias adicionales de manejo. La enfermedad afecta tanto flores como frutos, generando rechazo comercial y pérdidas significativas en sistemas intensivos.

El impacto económico de la pudrición gris se refleja en el rechazo comercial de frutos infectados y en el aumento de costos por fungicidas y medidas sanitarias. En sistemas intensivos, la enfermedad reduce tanto el rendimiento como la calidad agroindustrial, limitando su uso en procesos de transformación. (Jardinería On, 2025)

Por esa misma causa se han desarrollado varias alternativas sostenibles de manejo, entre ellas el uso de PGPR como *Bacillus spp.*, *Pseudomonas* y *Azotobacter*, capaces de inducir resistencia sistémica y reducir la severidad de la enfermedad en tomate (González-Fernández et al., 2019; Mazuecos-Aguilera et al., 2025).

2.2.4 Estrategias convencionales de manejo y sus limitaciones

El manejo de *Botrytis cinerea* en tomate se ha sustentado tradicionalmente en la aplicación preventiva o curativa de fungicidas sintéticos como iprodiona, boscalida, fenhexamida y carbendazim en invernaderos. Aunque estos productos han mostrado eficacia inicial en la reducción de la pudrición gris, su uso intensivo ha favorecido la aparición de poblaciones resistentes, disminuyendo su efectividad a largo plazo (Hahn, 2014)

Además de los fungicidas, se emplean prácticas culturales como la ventilación adecuada del invernadero, la reducción de la humedad relativa, la eliminación de restos vegetales infectados y el control de la densidad de follaje. Estas medidas buscan limitar los factores predisponentes que favorecen la germinación de conidios y la colonización de tejidos (Agrológica, 2023)

No obstante, las estrategias convencionales presentan limitaciones relevantes: el uso repetido de fungicidas incrementa los costos de producción y deja residuos químicos en los frutos, lo que compromete la inocuidad alimentaria y reduce su aceptación en los mercados de exportación (Pavone, 2021)

La resistencia del patógeno reduce la eficacia de los tratamientos, lo que obliga a rotar productos o incrementar las dosis, intensificando los impactos ambientales. Por su parte, las prácticas culturales requieren un control constante del microclima, algo difícil de sostener en sistemas intensivos con alta densidad de plantas. Ante estas limitaciones, se ha impulsado la gestión integrada de la enfermedad, que combina prácticas culturales, el uso racional de fungicidas y alternativas biológicas como microorganismos benéficos (PGPR, *Trichoderma* spp.), capaces de inducir resistencia sistémica y competir con el patógeno en la rizósfera (Sarmiento, 2025)

2.3. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)

2.3.1 Definición y clasificación funcional

El empleo de biofertilizantes formulados con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal se reconoce como una alternativa biotecnológica eficaz para mejorar la productividad de cultivos hortícolas de interés (Laura Luna Martínez, 2013)

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) son bacterias que colonizan la raíz y la zona de influencia del suelo rizosférico. Su importancia en la agricultura radica en los diversos mecanismos de interacción que establecen con las plantas. Estas asociaciones pueden ser intracelulares, cuando las bacterias penetran en las células de la raíz y forman nódulos visibles, o extracelulares, cuando se localizan en la rizósfera, el rizoplasma o en los espacios intercelulares de la corteza radicular. En ambos casos, contribuyen de manera significativa al desarrollo y productividad de los cultivos (Ahemad & Kibret, 2013)

2.3.2 Mecanismos de acción

Los mecanismos directos comprenden la síntesis de fitohormonas como ácido indolacético, giberelinas y citoquininas, además de favorecer la absorción de nutrientes. Por otro lado, los mecanismos indirectos incluyen procesos de antibiosis, competencia por nichos ecológicos, producción de sideróforos e inducción de resistencia sistémica adquirida (Glick, 2012)

En el caso de *Botrytis cinerea*, se ha comprobado que rizobacterias promotoras del crecimiento como *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis* pueden disminuir la severidad de la pudrición gris mediante la producción de metabolitos con actividad antifúngica y la activación de genes de defensa en tomate (Compant et al., 2005)

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal desempeñan un papel esencial dentro de los enfoques biológicos de la agricultura, al contribuir significativamente en procesos que favorecen el desarrollo y la calidad de los cultivos.

Diversos estudios han demostrado que estas bacterias participan en la detoxificación de metales pesados y la degradación de pesticidas, reduciendo la toxicidad del suelo y los residuos químicos (Hasan et al., 2024).

Asimismo, actúan como agentes de biocontrol frente a fitopatógenos e insectos, disminuyendo la necesidad de fungicidas sintéticos (Espinosa-Palomeque et al., 2025; Modiba et al., 2025).

Otro mecanismo clave es la fijación de nitrógeno atmosférico y la solubilización de fosfatos, lo que incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales para la planta (Hasan et al., 2024). Al igual que la producción de fitohormonas como el ácido indolacético (AIA) estimula directamente el crecimiento vegetal y mejora atributos de calidad en frutos de tomate (Modiba et al., 2025).

2.3.3 Evidencias de actividad antifúngica frente a *Botrytis cinerea*

Diversos estudios recientes han demostrado que PGPR nativas de regiones semiáridas pueden inhibir el crecimiento de *Botrytis cinerea* en condiciones de laboratorio y disminuir la incidencia de la enfermedad en invernaderos. Un ejemplo es *Bacillus amyloliquefaciens*, capaz de producir lipopeptidos como surfactina y fengicina, reconocidos por su actividad antifúngica (Ongena & Jacques, 2008).

De igual manera, *Pseudomonas spp.* generan sideróforos y compuestos volátiles que pueden reducir la germinación de conidios y fortalecen la resistencia sistémica de la planta (Raaijmakers et al., 2009)

2.3.4 Aplicaciones en cultivos hortícolas bajo condiciones protegidas

El uso de PGPR en sistemas protegidos se ha consolidado como una estrategia sostenible para disminuir la dependencia de fungicidas sintéticos. En tomate, su aplicación ha demostrado beneficios como la reducción de la pudrición gris, el estímulo del crecimiento vegetativo y del rendimiento, la mejora en la calidad del fruto —peso, firmeza y grados Brix—, así como una mayor tolerancia frente a estreses abióticos (Calvo et al., 2014).

Algunos estudios que se han hecho como el de González Rodríguez, G. (2016).

Donde Evaluó PGPR en invernadero y encontró mejoras en licopeno, vitamina C, azúcares reductores y sólidos solubles.

También agrega que la PGPR son una alternativa sostenible frente al uso excesivo de fertilizantes sintéticos

Al igual que lo señalado por Cano-Hernández et al. (2016), aunque el estudio se centró en el uso de biorreguladores, se confirma que el manejo biológico en sistemas de invernadero favorece atributos de calidad como la firmeza, la acidez, el contenido de licopeno y la vida útil de los frutos. Estos efectos se vinculan directamente con la acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), que actúan como bioestimulantes al mejorar tanto la productividad como la calidad del cultivo.

2.4. Bacterias nativas del noreste de México como bioinsumos

2.4.1 Justificación territorial y adaptación agroecológica

Estudios hechos por INIFAP que señalan la baja fertilidad y problemas de salinidad en suelos del noreste de México. Así mismo FAO y SAGARPA, que han documentado la escasez de agua, irregularidad de lluvias y limitaciones de nutrientes como factores que condicionan la productividad agrícola en esa región. (Gobierno de México, 2023).

Además, que el clima de la zona se caracteriza por condiciones áridas, clasificándose como región semidesértica de acuerdo con la tipología de Köppen modificada por (García (2004).

Esto ha impulsado la búsqueda de sistemas de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Un ejemplo claro es la utilización de microorganismos empleados como biofertilizantes, los cuales se consideran alternativas ecológicas, ya que están constituidos principalmente por células vivas de cepas seleccionadas capaces de aportar nutrientes esenciales a las plantas a través de su sistema radicular. (Wang et al., 2025)

Diversas cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), como *Pseudomonas* y *Bacillus*, han mostrado resultados efectivos en la mejora del desarrollo radicular y en la calidad de los suelos bajo condiciones semiáridas, lo que respalda su potencial como biofertilizantes en sistemas agrícolas sostenibles (INIFAP, 2023).

El aislamiento de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal directamente del ecosistema en el que serán aplicadas resulta esencial, ya que su adaptación a las condiciones edafoclimáticas locales asegura un desempeño más eficiente como bioinsumos. (Chapa Marmolejo, 2024).

2.4.2 Potencial biotecnológico en el manejo integrado de enfermedades

En el campo del biocontrol de fitopatógenos, diversas especies de bacterias y hongos se han empleado con ventajas significativas frente a los pesticidas químicos. Entre los beneficios de estos agentes microbianos se encuentra su acción dirigida hacia blancos específicos, su bajo riesgo de generar infecciones en animales o humanos —excepto en individuos inmunocomprometidos— y la ausencia de efectos contaminantes sobre los recursos naturales (García-Cervante 2024).

El control biológico de fitopatógenos puede llevarse a cabo mediante la aplicación de extractos libres de células provenientes de microorganismos benéficos, o bien a través de concentrados purificados que contienen moléculas con diversa naturaleza estructural

y bioquímica. Estos compuestos derivados de agentes de biocontrol ejercen su acción principalmente por mecanismos de antibiosis, inhibiendo el desarrollo de organismos dañinos para las plantas.

En el ámbito del biocontrol de fitopatógenos, las bacterias —particularmente las pertenecientes al género *Bacillus*— han adquirido un papel predominante, ocupando la primera posición debido a sus capacidades biológicas, entre las que destaca la producción de una amplia gama de antibióticos dirigidos contra microorganismos competidores (Huang et al., 2022; Lee et al., 2023)

Por su capacidad de moverse hacia las raíces (quimiotaxis) y de formar biopelículas en la rizodermis, estas bacterias logran establecerse eficazmente en la planta. (Dong et al., 2024)

Por su capacidad —aunque no siempre presente— de sintetizar fitohormonas como el ácido indolacético, una auxina que estimula la división celular en los tejidos vegetales, estas bacterias pueden modificar la arquitectura de la raíz, favoreciendo la formación de más raíces laterales y el alargamiento de los pelos absorbentes. (de Oliveira-Paiva et al., 2024)

Y también un poco más relacionado a nuestro experimento, Por su facilidad con que estas bacterias pueden activar en las plantas la llamada resistencia sistémica inducida, se logra que la planta incremente su capacidad defensiva frente al ataque de patógenos. (Yang et al., 2024).

2.4.3 Estudios previos en tomate y otros cultivos regionales

Actuales estudios en tomate han demostrado que cepas de PGPR como *Pseudomonas* y *Peribacillus* reducen la incidencia de *Botrytis cinerea* mediante la activación de resistencia sistémica (Mazuecos-Aguilera et al., 2025).

Por otro lado, el uso de tecnologías ómicas ha sido fundamental para profundizar en el conocimiento de las respuestas fitohormonales y los cambios en la expresión genética que ocurren durante la interacción de la planta con el patógeno. (AbuQamar et al., 2016)

Evidencias generadas por el INIFAP (2023) subrayan que las cepas bacterianas nativas poseen un alto valor biotecnológico, ya que optimizan la fertilidad edáfica y robustecen la defensa inmunitaria en cultivos de importancia regional. Estos hallazgos validan la integración de bioinsumos nativos en la gestión de enfermedades en el área.

Al igual que en la UAAAN a liderado diferentes experimentos como los de González 2016 Este trabajo evaluó la inoculación de PGPR en tomate bajo invernadero, analizando cómo estas bacterias compensan las condiciones extremas del semidesierto y Ezpinoza 2016 donde el trabajo validó el uso de cepas de *Bacillus* y *Pseudomonas* aisladas de la Comarca Lagunera, mostrando incrementos de hasta un 20% en el volumen radicular y una reducción significativa en la severidad de enfermedades fúngicas.

2.4.4 Ventajas frente a cepas comerciales: resiliencia, compatibilidad y soberanía científica

Los microorganismos adaptados a un entorno edáfico específico suelen mostrar limitaciones al intentar colonizar ambientes distintos (Hartmann 2023). porque fueron aisladas en condiciones ideales de laboratorio o climas templados; en cambio, las cepas nativas poseen una mayor capacidad de establecimiento y de mantener funciones biológicas esenciales, especialmente en suelos de baja fertilidad o bajo condiciones de estrés. (Jiang 2023)

El estudio hecho por Zhou et al., (2024) evidencia que los microorganismos nativos centrales destacan por su capacidad de colonización, simbiosis estable y propiedades de promoción del crecimiento, lo que les permite superar a los nativos no centrales y a los no nativos. En contextos de agricultura intensiva y suelos degradados, representan una alternativa eficaz para optimizar la producción agroecosistémica. Dicho potencial se relaciona con sus propiedades de promoción del crecimiento, la simbiosis equilibrada dentro de la comunidad microbiana y su elevada capacidad de colonización

Las limitadas tasas de supervivencia de los microorganismos en el suelo, junto con los elevados costos de aplicación, restringen el potencial de los microbiomas edáficos para

contribuir de manera efectiva a la salud y productividad de las plantas. (Sun et al., 2016, Herrmann et al., 2013)

En consecuencia, resulta fundamental desde el punto de vista económico y ambiental identificar materiales portadores de bajo costo, libres de contaminantes y sostenibles, que permitan formular biofertilizantes microbianos eficientes y estables. El objetivo es conformar comunidades diversas y funcionalmente equilibradas, basadas en taxones clave, capaces de favorecer el crecimiento vegetal mediante la restauración de la diversidad microbiana y la provisión de servicios benéficos para las plantas (Zhou et al., 2024).

Aunque se han logrado avances en investigación, difusión y aplicación del conocimiento a nivel nacional, la regulación y legislación sobre el uso de microorganismos en biofertilización sigue siendo limitada. El gran desafío para alcanzar una agricultura sostenible consiste en garantizar la producción suficiente de alimentos para el futuro, optimizando el uso del suelo, reduciendo el impacto ambiental y fortaleciendo la economía de los agricultores. (López y Rodríguez 2014)

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el invernadero número uno de departamento de horticultura, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Unidad laguna UAAAN-UL. se encuentra ubicada en el periférico y carretera santa fe km 1.5 Torreón Coahuila, México.

3.2 Material vegetal y siembra

Material vegetal

Se utilizó semilla de tomate SALADETTE (tipo Roma) indeterminado, diseñado para alto rendimiento y resistencia. Ideal para invernadero y malla sombra. Las semillas fueron seleccionadas por su uniformidad y calidad fisiológica, asegurando una germinación homogénea.

Siembra en charolas

La siembra de la semilla se realizó en charolas germinadoras de poliestireno de 200 cavidades, colocando una semilla por cavidad utilizando peat Moss como sustrato para la germinación, rellenando uniformemente las cavidades de las charolas y agregando una pequeña capa de sustrato para tapar la semilla, colocándola dentro de una bolsa de plástico de color negro para conservar la humedad, colocándolo al interior del invernadero, se realizó el riego frecuente para mantenerla humedad hasta realizar el trasplante.

Llenado de macetas

Se llenaron bolsas de plástico color negro con capacidad de 10 litros y perforadas en la base para el drenaje del agua. Se realizó el llenado del sustrato los cueles eran arena y perlita.

Trasplante

Se llevó a cabo cuando la planta alcanzo una altura de 12 a 15 cm de altura colocando una planta por maceta y acomodándolo en su respectivo tratamiento,

3.3 Material microbiológico

Se emplearon cepas bacterianas nativas del noreste de México, previamente aisladas y caracterizadas los cuales fueron proporcionadas por la colección de organismos Rizosfericos y Edáficos del Noreste de Mexico (CORE-NORESTE).

Los tratamientos incluyeron cuatro cepas: ANBB48B (*Bacillus mojavenensis*), ANBB45B (*Bacillus subtilis*), ANBB6 (*Bacillus spizizenii*) y ANBB66 (*Bacillus innocuosorum*). Estas cepas fueron seleccionadas por su potencial como promotoras del crecimiento vegetal y agentes de biocontrol, dada su adaptación a condiciones áridas y su capacidad de colonizar la rizosfera del tomate bajo condiciones de invernadero.

Preparación de inóculo

Preparación del inóculo bacteriano donde las cepas bacterianas previamente sembradas en cajas Petri con medio de agar nutritivo fueron reactivadas y aisladas para su posterior multiplicación.

Cada cepa se transfirió a matraces con caldo nutritivo preparado a razón de 4 gr. de medio/ 1 litro de agua destilada, asegurando condiciones estériles.

La preparación y manipulación se realizaron en una campana de flujo laminar, utilizando instrumental previamente esterilizado en autoclave y desinfectando el área de trabajo con alcohol al 70%. De esta manera se garantizó la pureza de los cultivos y la ausencia de contaminación cruzada antes de su aplicación en los tratamientos.

Los matraces inoculados fueron colocados en un agitador orbital (shaker) a 150 rpm, durante un periodo de 24 horas, con el fin de asegurar una aireación constante y la adecuada homogeneización de los nutrientes, lo que permitió el crecimiento bacteriano.

Aplicación de las bacterias a las plantas

El inóculo bacteriano preparado se colocó en tubos de medición estériles. Para cada planta correspondiente a su tratamiento se aplicó 1 mL de suspensión bacteriana, depositado directamente en la base de la planta, favoreciendo su absorción radicular. Este método permitió una inoculación localizada y uniforme, asegurando que cada planta recibiera la cepa asignada sin riesgo de contaminación cruzada entre tratamientos.

Sistema de producción

El ensayo se llevó a cabo bajo condiciones controladas en invernadero, utilizando un sistema de riego por goteo individualizado. Para ello se instalaron estacas de riego en cada maceta, conectadas a una línea principal, de manera que cada bolsa con sustrato recibiera un suministro uniforme de agua. Este sistema permitió mantener condiciones homogéneas de humedad y nutrición en todas las unidades experimentales, correspondientes a los cuatro tratamientos bacterianos y al testigo.

Preparación del patógeno (*Botrytis cinerea*):

Reactivación del patógeno

Esta fue realizada y proporcionada por miembros del grupo de investigación CORE Noreste, quienes contaban con este hongo en su colección almacenada. La siembra se efectuó en cajas Petri con medio Papa Dextrosa Agar (PDA), bajo condiciones controladas, y posteriormente se incubó a 25 °C durante cinco días, lo que permitió obtener un crecimiento activo y adecuado para su uso experimental.

Preparación del inóculo

Se añadió agua destilada estéril —en ocasiones suplementada con una gota de Tween 20 al 0.1% para reducir la tensión superficial— sobre las colonias en cajas Petri, raspando suavemente con una varilla o asa estéril para liberar las esporas. La suspensión obtenida se filtró a través de una gasa estéril con el fin de eliminar restos de micelio y fragmentos de agar, conservando únicamente el líquido con esporas. Posteriormente, se realizó el

conteo en cámara de Neubauer bajo microscopio para determinar la concentración, la cual se ajustó a 1×10^6 conidios/mL, asegurando uniformidad y viabilidad del inóculo.

Aplicación al cultivo

La suspensión de esporas preparada se colocó en un atomizador y se trasladó al invernadero para su aplicación en las plantas de tomate. Se realizaron cinco repeticiones por cada tratamiento, incluyendo el testigo. A las plantas se les practicaron cortes y heridas controladas para facilitar la entrada del patógeno, y posteriormente las zonas infectadas fueron cubiertas con bolsas plásticas, con el fin de generar un microambiente favorable para el desarrollo de *Botrytis cinerea*.

Se utilizó la Escala diagramática para evaluar la severidad del moho gris (*Botrytis cinerea*) de Hernandez et al. (2023).

Clase	Descripción	Síntomas principales
0	Sin infección	Hoja sana, verde, sin lesiones ni micelio.
1	Muy leve (<5%)	Pequeñas manchas necróticas puntuales en el borde o superficie; sin esporulación visible.
2	Leve (5–25%)	Necrosis parcial de la lámina; inicio de micelio gris tenue en zonas localizadas.
3	Moderada (25–50%)	Necrosis evidente en gran parte de la hoja; micelio gris aterciopelado cubriendo áreas amplias.
4	Severa (50–75%)	Necrosis generalizada; hoja colapsada con abundante esporulación gris; pérdida de turgencia marcada.
5	Muy severa (>75–100%)	Hoja completamente necrosada, cubierta de micelio gris; tejido muerto y colapsado.

3.5 Manejo del cultivo

Tutorado

Las plantas fueron guiadas al tallo sosteniendo cada planta con rafia, el tutorado se realizó cuando la planta alcanzo una altura comprendida entre 20 a 35 cm, esta actividad se llevó a cabo con la finalidad de obtener la planta erguida y con ello evitar que las hojas

y frutos queden en contacto con el suelo y/o sustrato, favoreciendo una mejor entrada de luz y ventilación, esta labor se llevó a cabo con un amarre de la rafia desde la base del tallo y conforme la planta fue creciendo se volvía a enredar a la rafia.

Fertilización

Para la fertilización se utilizó un tinaco de 500 litros, donde se aplicaron los fertilizantes solubles utilizando la fórmula de Steiner al 50 %. Para después aplicar los fertilizantes vía riego.

Poda de hojas y brotes axilares

Esto se hace para obtener una planta aun solo tallo, la eliminación de brotes axilares se realizó conforme a la observación de las plantas. El desoje consistió en eliminar las hojas senescentes en la parte inferior de la punta, evitando la presencia de agentes dañinos. Las hojas se podaron hasta donde se encontró el primer racimo y también se dejó una hoja antes de cada racimo manteniendo de esta manera en todo el ciclo del cultivo.

Polinización

Se llevó a cabo manualmente cuando comenzó la etapa de floración, con el movimiento de los tutores haciendo una ligera vibración y con la ayuda del aire de los ventiladores.

Control de plagas y enfermedades

Para tener el control de las enfermedades y plagas se realizaron revisiones diarias para detectar la presencia de plagas y enfermedades. Las plagas que más se presentaron fueron la mosquita blanca (*Bemisia Tabaci* Y *Trialeurodes vaporariorum*) para el control se aplicación de productos químicos como Sivanto con una dosis de 1.5 ml/L de agua (Tabla 1).

Cosecha

La cosecha se realizó cuando los frutos presentaban una coloración de 1/3 y hasta 2/3 de coloración. Se realizaron 4 cortes llevándose a cabo cada siete u ocho días.

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS PARA CONTROL DE PLAGAS

Función	Ingrediente Activo	Nombre comercial	Dosis
Fungicida	Hidróxido de calcio	Bio calcio E	1 a 2ml /L
Insecticida	Malathion	Malatión	.5 ml/L
Insecticida	Flupiradifurona (flupyradifurone)	Sivanto	.5 ml/L

3.6 Descripción de los tratamientos

El ensayo se diseñó con cuatro tratamientos bacterianos y un testigo absoluto (sin inoculación), distribuidos en filas de 11 unidades experimentales cada una (Tabla 2). Las cepas utilizadas corresponden a bacterias nativas del noreste de México, previamente aisladas y caracterizadas por su potencial como promotoras del crecimiento vegetal y agentes de biocontrol frente a *Botrytis cinerea*.

Cada tratamiento se dispuso en filas de 11 unidades experimentales, asegurando uniformidad en la distribución y permitiendo un análisis estadístico confiable de las variables de crecimiento

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS

TRATAMIENTO	CEPA bacteriana	Número de repeticiones
<i>T1</i>	ANBB45B	11
<i>T2</i>	ANBB66	11
<i>T3</i>	ANBB45B	11
<i>T4</i>	ANBB6	11
<i>Testigo</i>	CONTROL (-)	11

3.7 Variables agronómicas evaluadas

Para las variables evaluadas y la medición de los datos se utilizaron, cinta métrica, bascula digital, vernier refractómetro, cuchillo

Crecimiento vegetativo

- Se tomó la altura de planta desde la base hasta el ápice
- Número de ramas
- Diámetro del tallo

Calidad de fruto

- Firmeza (N o %): Se utilizó un aparato llamado penetrómetro Se presiona el puntal en la zona ecuatorial del fruto hasta que penetra la pulpa.
- Contenido de sólidos solubles (°Brix), esta variable se determinó colocando el juego del fruto directamente en la base del refractómetro para tomar la lectura
- Contenido de vitamina C: La cuantificación de vitamina C se realizó mediante el método volumétrico de titulación con el reactivo 2,6-diclorofenolindofenol y tomado las medidas de peso en gr., Volumen total y p.
- Diámetro polar, para esta variable se colocó el fruto de manera vertical colocándolo en el vernier midiendo la distancia entre el péndulo y la cicatriz floral
- Diámetro ecuatorial: Para evaluar esta variable se colocó el fruto de forma transversal la parte más ancha sobre el vernier, los datos obtenidos se registraron en centímetros
- Pericarpio Se realiza un Corte transversal Debe ser un corte limpio por la zona ecuatorial del tomate (la parte más ancha luego Se mide la distancia desde la epidermis (cáscara) hasta la parte interna donde comienza la cavidad locular (donde están las semillas).

Rendimiento

- Se realizó peso total de frutos por planta
- Se tomó el número de frutos cosechados por planta, que ya tuvieran una buena tonalidad roja y lista para el corte

Sanidad vegetal

- Incidencia y severidad de enfermedades

Análisis estadístico

Se empleó el software estadístico InfoStat y Statgraphics.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables morfométricas

Para las variables, altura de planta, diámetro de tallo y número de ramas se realizó el análisis de datos donde los valores promedio y la desviación estándar $\pm$ SEM cm se muestran en la Tabla 3; donde se puede observar que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos

Esto puede deberse a que las cepas PGPR evaluadas no ejercieron un efecto marcado sobre la morfología aérea en las condiciones del experimento donde posible que las plantas ya tuvieran un buen nivel nutricional y fisiológico, reduciendo la capacidad de las PGPR de generar cambios visibles en estas variables. Esto responde a que respuesta morfométrica puede ser más sensible en etapas tempranas del crecimiento o bajo condiciones de estrés como las que tuvimos en nuestro experimento por estrés de calor lo que explicaría la falta de diferencias.

Esto puede coincidir a estudios como los de Bastías et al. (2016) reportan que no todas las cepas de *Pseudomonas fluorescens* generan cambios significativos en altura o diámetro, aunque sí en rendimiento.

También lo que menciona Kumar et al. (2019) donde observaron que algunas cepas de PGPR aumentaron número de ramas, pero otras no mostraron diferencias, confirmando la variabilidad de respuesta y Ait Barka et al. (2024) señalan que la respuesta morfométrica depende de la interacción específica planta–cepa y de las condiciones ambientales.

TABLA 3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS VARIABLES MORFOMÉTRICAS

<i>Cepa</i>	<i>Altura de planta</i>	<i>Diámetro de tallo (cm)</i>	<i>Número de ramas</i>
<i>ANBB48b</i>	113 ± 7.50 a	1.56 ± .09 a	16 ± 0.95 a
<i>ANBB66</i>	116.72 ± 7.50 a	1.58 ± .08 a	16.09 ± 1.72 a
<i>ANBB45b</i>	112.36 ± 7.08 a	1.63 ± .13 a	15.73 ± 1.35 a
<i>ANBB6</i>	114 ± 6.66 a	1.55 ± .10 a	15.09 ± 1.08 a
<i>Control (-)</i>	110.27± 1.05 a	1.65 ± .16 a	14.64 ± 0.88 a

Valores de la media ($\pm$ desviación estándar). Letras iguales en la misma columna indican que no hubo diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

4.2 Efecto de la inoculación sobre el rendimiento del tomate (peso, número de frutos, calidad)

Vitamina c

De acuerdo con los resultados obtenidos en la variable Vitamina C, podemos observar que hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Fig. 1). Destacando la cepa ANBB66 en 23.82% el contenido de Vitamina C respecto a lo obtenido con el tratamiento control. Esto se puede deber a que las rizobacterias mejoran la absorción de nutrientes, estimulan rutas antioxidantes y regulan el metabolismo secundario de la planta, lo que favorece la síntesis de compuestos nutraceuticos.

Este hallazgo confirma el potencial de las PGPR como bioestimulantes capaces de mejorar no solo el rendimiento, sino también parámetros de calidad poscosecha. Estos resultados se relacionan con lo reportado por Cano-Hernández et al. (2016), quienes observaron que el manejo biológico en sistemas de invernadero favorece atributos de calidad como la firmeza, la acidez y el contenido de licopeno, prolongando la vida útil de los frutos., esta similitud de datos en la mejora de parámetros de calidad reafirma la evidencia de que los enfoques biológicos tienen un impacto positivo en la calidad del tomate.

Tambien Kaundal et al. (2025) reportaron incrementos significativos en parámetros de desarrollo vegetal asociados a la producción de fitohormonas y sideróforos. Aunque estos trabajos se enfocaron principalmente en crecimiento, los mecanismos descritos explican también la acumulación de compuestos antioxidantes como la vitamina C.

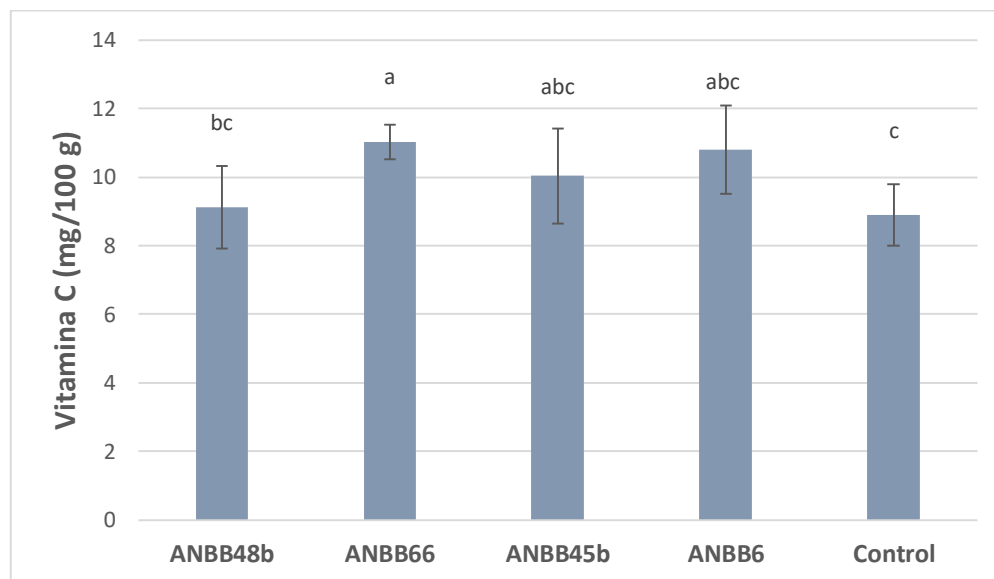


FIGURA 1. CONTENIDO PROMEDIO DE VITAMINA C (MG/100 G) EN FRUTOS DE TOMATE TRATADOS CON LAS CEPAS. CADA BARRA REPRESENTA LA MEDIA DE ONCE REPETICIONES, CON LÍNEAS VERTICALES QUE INDICAN EL ERROR ESTÁNDAR DE LA MEDIA. LAS LETRAS SOBRE LAS BARRAS SEÑALAN GRUPOS ESTADÍSTICAMENTE DIFERENTES SEGÚN LA PRUEBA DE TUKEY ($P < 0.05$).

Firmeza

En los resultados obtenidos, la cepa ANBB6 mostró un incremento del 21.27% en la firmeza del fruto de tomate respecto al tratamiento control (Fig. 2). Este efecto es relevante porque la firmeza constituye un atributo de calidad postcosecha directamente relacionado con la vida útil y la aceptación comercial del producto.

Una vez mas podemos decir que se comparan con los resultados obtenidos por Cano-Hernández et al. (2016), quienes observaron que el manejo biológico en sistemas de invernadero contribuye a mejorar parámetros de calidad como la firmeza, la acidez y el contenido de licopeno, prolongando la conservación de los frutos.

El aumento del 21.27% en la firmeza del fruto de tomate observado con la cepa ANBB6 coincide con lo reportado por Pérez-Rodríguez et al. (2020), quienes documentaron aumentos de entre 21 y 24% en firmeza tras la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* y *Azospirillum brasilense* bajo condiciones de campo. Esta similitud refuerza la evidencia de que las rizobacterias contribuyen a mejorar atributos poscosecha, fortaleciendo la

pared celular y prolongando la vida útil del fruto, tanto en sistemas de invernadero como en producción a campo abierto.

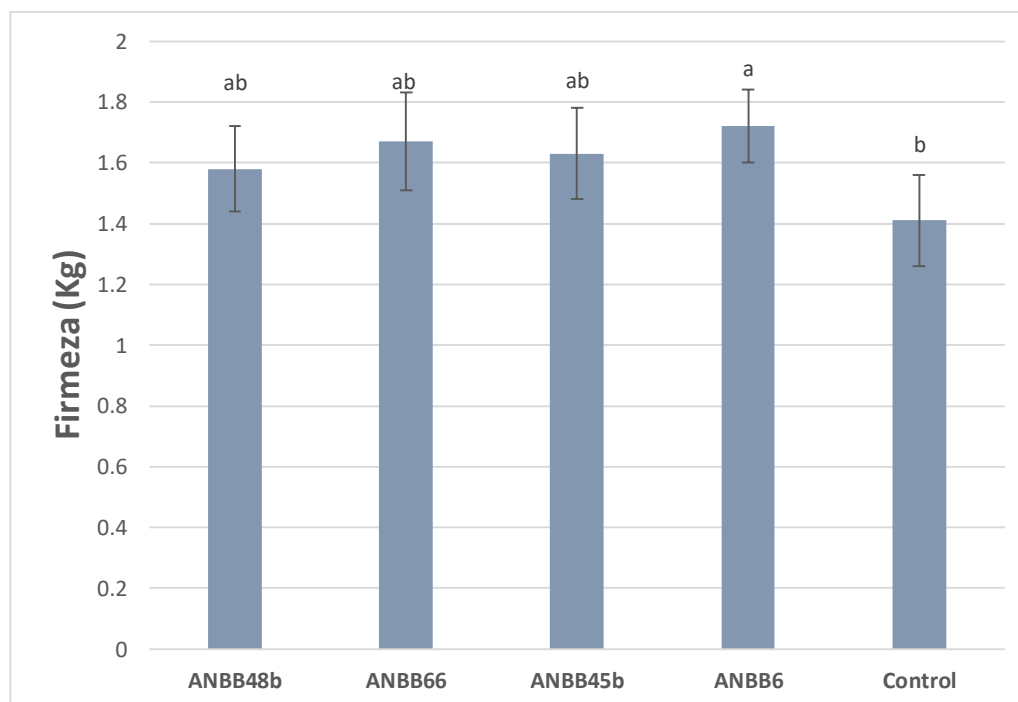


FIGURA 2. FIRMEZA (KG) PROMEDIO ($\pm$ ERROR ESTÁNDAR) DE FRUTOS DE TOMATE INOCULADOS CON CEPAS Y TRATAMIENTO CONTROL. CADA BARRA REPRESENTA LA MEDIA DE 11 REPETICIONES ($N = 11$); LAS LÍNEAS DE ERROR SOBRE LAS BARRAS CORRESPONDEN A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA. LAS LETRAS SOBRE LAS BARRAS INDICAN GRUPOS ESTADÍSTICAMENTE DIFERENTES SEGÚN LA PRUEBA DE TUKEY (NIVEL DE SIGNIFICANCIA: $P < 0.05$).

Rendimiento

El análisis de varianza mostró diferencias significativas en el rendimiento de frutos de tomate entre los tratamientos evaluados. El tratamiento con la cepa ANBB48b presentó el mayor rendimiento promedio, con un incremento del 57.26% respecto al control (como se muestra de la Fig.3) lo que evidencia un efecto positivo de esta cepa en la productividad. Los tratamientos ANBB45b y ANBB6 mostraron rendimientos intermedios, agrupados estadísticamente como *ab*, mientras que ANBB66 se agrupó con el control

(b), indicando que no generó un aumento significativo en el rendimiento bajo las condiciones del ensayo.

El incremento observado en el rendimiento con la cepa ANBB48b puede explicarse por varios mecanismos atribuidos a las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). Estas incluyen la producción de fitohormonas como auxinas y giberelinas, que estimulan la floración y el cuajado de frutos; la solubilización de fósforo y micronutrientes, que mejora la absorción y disponibilidad de nutrientes esenciales; y la síntesis de sideróforos y metabolitos antimicrobianos, que reducen la presión de patógenos y permiten destinar mayor energía al crecimiento reproductivo.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Cano-Hernández et al. (2016), quienes observaron incrementos significativos en el rendimiento de tomate bajo invernadero tras la inoculación con cepas de *Bacillus subtilis*. De manera similar, Pérez-Rodríguez et al. (2020) documentaron que la aplicación de PGPR en sistemas protegidos incrementó la producción y mejoró parámetros de calidad como sólidos solubles y licopeno. Asimismo, el INIFAP (2023) ha señalado que las cepas bacterianas nativas poseen un alto valor biotecnológico, ya que optimizan la fertilidad del suelo y fortalecen la defensa inmunitaria de los cultivos, lo que se refleja en mayores rendimientos.

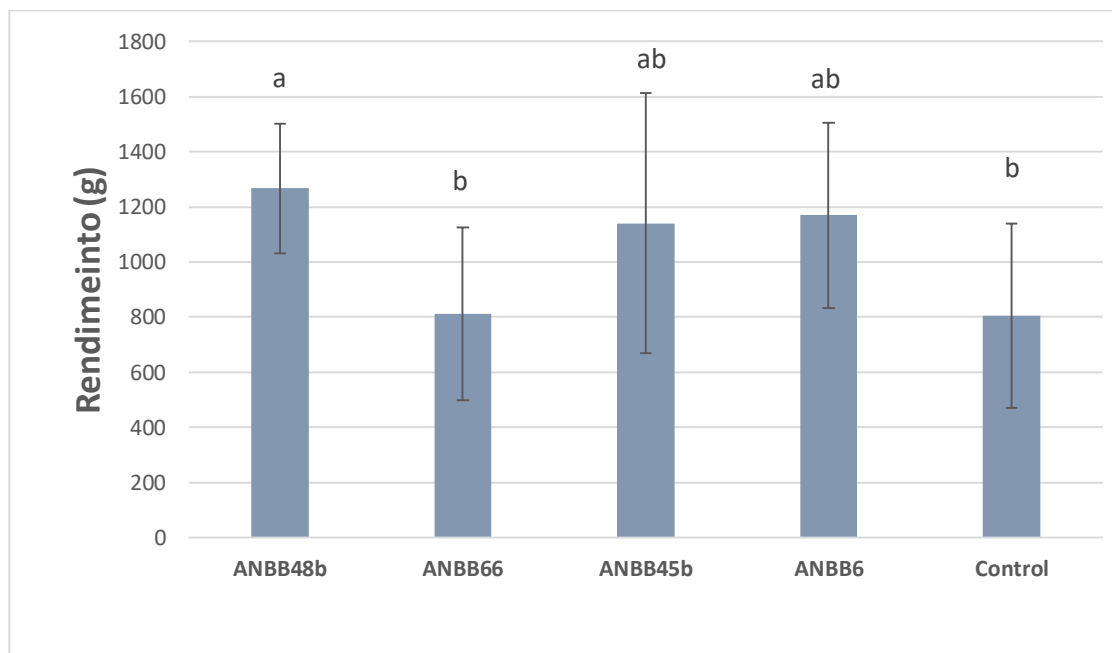


FIGURA 3. RENDIMIENTO PROMEDIO ($\pm$ ERROR ESTÁNDAR) DE FRUTOS DE TOMATE (G) EN TRATAMIENTOS CON CEPAS Y TRATAMIENTO CONTROL. CADA BARRA REPRESENTA LA MEDIA DE 11 REPETICIONES ($N = 11$); LAS LÍNEAS VERTICALES SOBRE LAS BARRAS CORRESPONDEN A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA. LAS LETRAS SOBRE LAS BARRAS INDICAN GRUPOS ESTADÍSTICAMENTE DIFERENTES SEGÚN LA PRUEBA DE TUKEY , NIVEL DE SIGNIFICANCIA: $P < 0.05$).

Número de frutos

El análisis de varianza mostró diferencias significativas en el número de frutos por planta entre los tratamientos. La cepa ANBB48b presentó el mayor número promedio de frutos, con un incremento del 55.9% respecto al control (Fig. 4) Los tratamientos ANBB45b y ANBB6 mostraron valores intermedios, agrupados como *ab*, mientras que ANBB66 se agrupó con el control (*b*), sin diferencias significativas. El aumento en el número de frutos pudo deberse a que las PGPR ayudan producción de auxinas y giberelinas que favorecen la floración y el cuajado, la solubilización de fósforo y micronutrientes que sostienen el desarrollo reproductivo, y la inducción de resistencia sistémica que reduce el estrés y permite mayor energía destinada a la formación de frutos.

estos resultados concuerdan con múltiples trabajos que documentan aumentos en el número de frutos tras inoculación con *Bacillus* y *Pseudomonas*. Por ejemplo, estudios

con *Bacillus subtilis* y *B. amyloliquefaciens* han mostrado incrementos significativos en frutos por planta y calidad de fruto (Gashash et al., 2022). Al igual que Ensayos que combinan PGPR con enmiendas (biochar, roca fosfórica) también reportan sinergias que potencian el cuajado y el número de frutos (Ait Barka et al., 2024; Springer, 2022).

Así que podemos decir que ANBB48b respalda el potencial de PGPR nativas para mejorar la productividad del tomate en invernadero. La magnitud del efecto y la variabilidad entre cepas subrayan la necesidad de selección y validación local de bioinsumos.

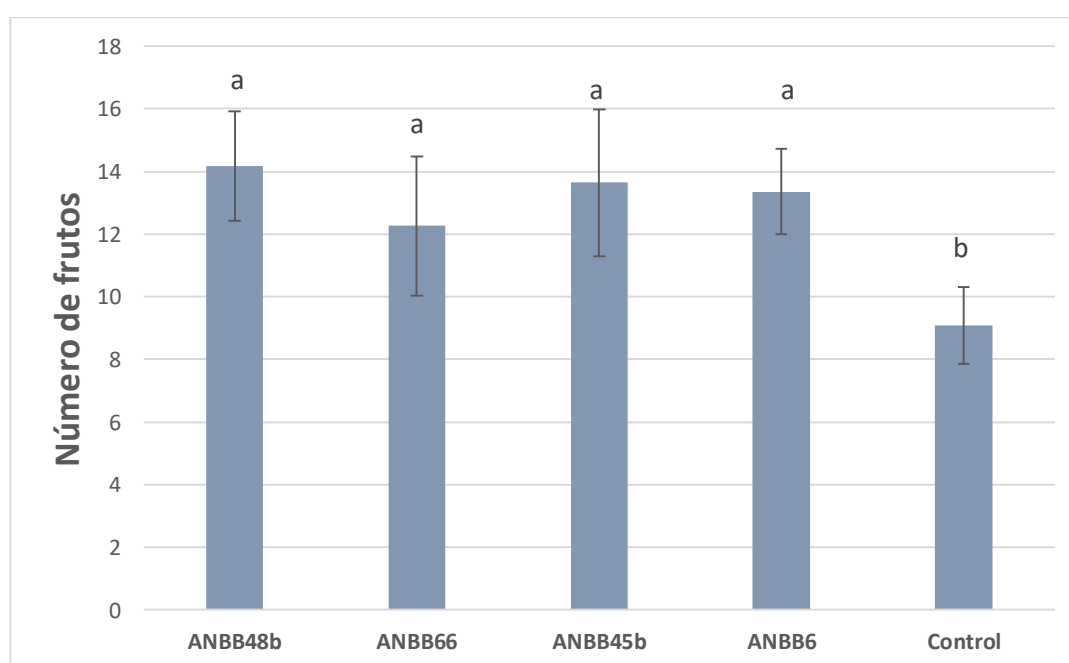


FIGURA 4. NÚMERO PROMEDIO DE FRUTOS POR PLANTA ($\pm$ ERROR ESTÁNDAR) EN TRATAMIENTOS CON CEPAS Y EL CONTROL. CADA BARRA REPRESENTA LA MEDIA DE 11 REPETICIONES ($N = 11$); LAS LÍNEAS VERTICALES SOBRE LAS BARRAS CORRESPONDEN A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MEDIA. LAS LETRAS SOBRE LAS BARRAS INDICAN GRUPOS ESTADÍSTICAMENTE DIFERENTES SEGÚN LA PRUEBA DE TUKEY CON UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA: $P < 0.05$.

Variables de calidad

Al analizar los datos de Las variables, Diámetro polar y ecuatorial y el Diámetro de pericarpio mostro que los valores medios fueron estadísticamente similares entre tratamientos y control, indicando que la forma y tamaño del fruto no se vieron alterados

por la inoculación. Al igual que Sólidos solubles totales (°Brix) No se observaron diferencias significativas; todos los tratamientos presentaron valores dentro del rango típico de tomate de invernadero (4–6 °Brix).

Los valores promedio y la desviación estándar se muestran en la Tabla 4; donde se puede observar que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos

La ausencia de diferencias significativas en estas variables sugiere que las PGPR evaluadas no influyeron directamente en la morfología externa ni en el contenido de azúcares del fruto bajo las condiciones del ensayo. Esto puede deberse a la especificidad de cepa: No todas las PGPR afectan parámetros de calidad; algunas influyen más en rendimiento o firmeza que en dimensiones o °Brix, o las Condiciones de cultivo o al sistema de invernadero que teníamos y la nutrición controlada por eso los efectos de PGPR sobre calidad pueden ser menos evidentes. Y otra razón es que el tamaño y forma del fruto están fuertemente determinados por la variedad y pueden ser menos sensibles a la inoculación microbiana.

TABLA 4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS VARIABLES DE CALIDAD EN TOMATE

Cepa	Diámetro polar (mm)	Diámetro Ecuatorial (mm)	SST (° Brix)	Dm pericarpio (mm)
<i>ANBB48b</i>	49.9 ± 2.67 a	63.75 ± 2.52 a	4.15 ± 0.13 a	6.8 ± 0.42 a
<i>ANBB66</i>	49.37 ± 1.90 a	60.32 ± 1.44 a	4.32 ± 0.22 a	7 ± 0.55 a
<i>ANBB45b</i>	49 ± 2 a	60.63 ± 2.58 a	4.33 ± 0.41 a	6.88 ± 0.95 a
<i>ANBB6</i>	49.28 ± 2.28 a	62.18 ± 2.06 a	4.62 ± 0.50 a	6.67 ± 0.51 a
<i>Control (-)</i>	48.55 ± 1.51 a	62.18 ± 3.60 a	3.97 ± 0.35 a	6.93 ± 0.33 a

Tabla 4. Valores de la media ($\pm$ desviación estándar) de las variables de calidad del tomate. Letras iguales en la misma columna (a) indican que no hay diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$)

Estudios como el de Gashash et al. (2022) Evaluaron *Bacillus subtilis* y *B. amyloliquefaciens* en tomate y encontraron mejoras en rendimiento y firmeza, pero no siempre en parámetros de calidad como °Brix, confirmando que el efecto depende de la cepa y la condición de cultivo y Pereira da Costa et al. (2014): En estudios de retrocruzas de tomate, observaron que el pericarpio y los sólidos solubles están más asociados a la genética que a la inoculación, aunque sí se identificaron marcadores moleculares relacionados con calidad.

Entonces podemos decir que estos estudios que muestran que las PGPR pueden tener efectos más marcados en rendimiento y firmeza que en atributos de calidad externa. Esto confirma que la selección de cepas debe seleccionarse según el objetivo productivo, si se busca mejorar calidad interna (azúcares, pericarpio), puede ser necesario combinar microorganismos beneficios con prácticas de manejo nutricional o seleccionar cepas específicas con efectos demostrados en estos parámetros.

Incidencia y severidad de la enfermedad de *Botrytis cinérea*

Nuestro experimento arrojó que el control mostró la mayor severidad de *Botrytis cinerea* en hojas infectadas, (como se muestra en la Fig. 5) mientras que los tratamientos ANBB6, ANBB48b y ANBB45b redujeron significativamente la enfermedad. Estos resultados sugieren un efecto sistémico de las PGPR, ya que fueron aplicadas en raíz (drench) y protegieron hojas superiores. La severidad se notó más en el control fue donde tuvimos el mayor nivel de necrosis y avance de la enfermedad.

Al contrario de los tratamientos encontramos que ANBB6 fue el más eficaz en reducir severidad, seguido de ANBB48b y ANBB45b.

Cabe mencionar que el efecto fue sistémico ya que la inoculación de las plantas se llevó a cabo a través de la raíz, mostrando reducción en hojas superiores, pese a la inoculación esto indica activación de mecanismos de defensa sistémica.

Estudios previos como los de Qi et al., 2018 confirman que PGPR pueden activar resistencia sistémica (ISR) y disminuir la incidencia y severidad de *Botrytis* en tomate. PGPR como *Bacillus* y *Pseudomonas* pueden activar vías de resistencia sistémica inducida (ISR), reduciendo la necesidad de fungicidas. Esto coincide con lo observado en nuestro ensayo, donde la inoculación en raíz protegió hojas distantes.

Al igual que Wang et al. (2021) demostraron que una cepa de *Pseudomonas aeruginosa* (CQ-40) controló *Botrytis cinerea* en tomate con eficacia del 74.4% en hojas y 66% en frutos, además de inducir enzimas de defensa.

Estos resultados avalan que PGPR pueden reducir severidad de *Botrytis* de manera comparable a lo observado con ANBB6, ANBB48b y ANBB45b.

Aunque Aguilera et al. (2025) señalan que la eficacia de PGPR contra *Botrytis* puede variar según condiciones ambientales y genotipo del tomate. En ciertos casos, la reducción en severidad no es significativa, lo que subraya la importancia de validar cepas nativas en cada región.

Entonces podemos decir que las cepas nativas confirmando su potencial como agentes biocontroladores. El efecto sistémico observado respalda la hipótesis de que las PGPR activan mecanismos de defensa en tejidos distantes a la raíz. Estos hallazgos son consistentes con estudios internacionales y refuerzan la importancia de seleccionar cepas adaptadas a condiciones locales para un manejo sostenible de la enfermedad.

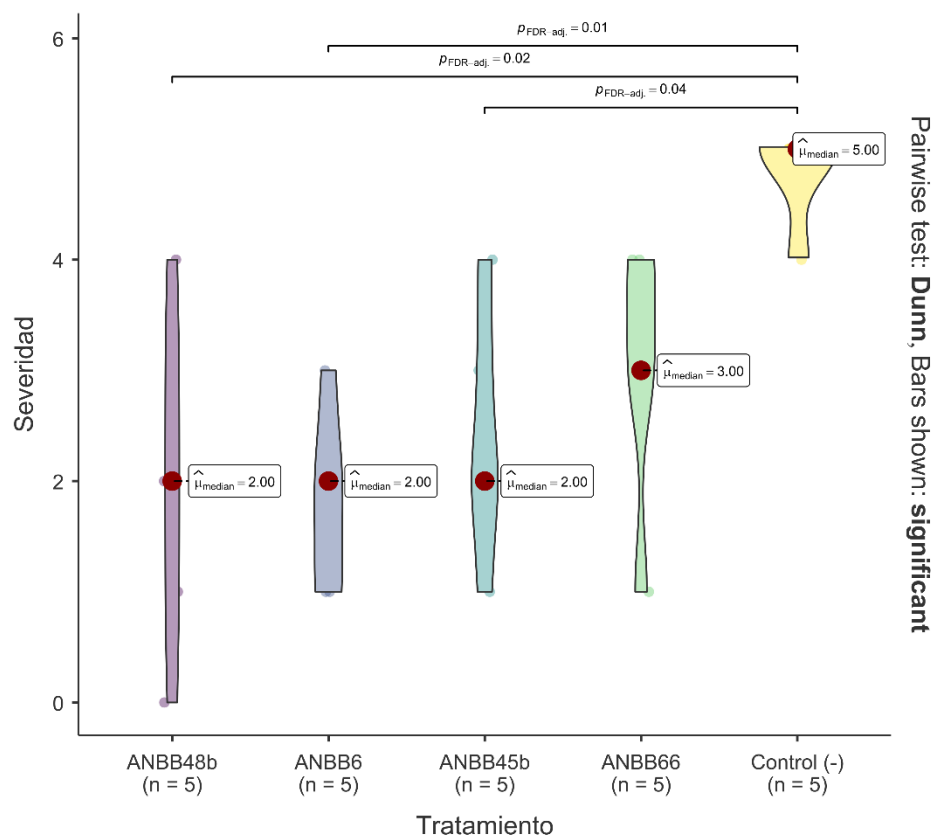


FIGURA 5. SEVERIDAD DE INFECCIÓN POR *BOTRYTIS CINERA* EN LA ZONA INOCULADA DE PLANTAS DE TOMATE TRATADAS CON DIFERENTE CEPAS (N = 5 POR TRATAMIENTO). LAS DISTRIBUCIONES SE MUESTRAN MEDIANTE GRÁFICOS DE VIOLÍN CON LA MEDIANA INDICADA EN ROJO. LAS DIFERENCIAS ENTRE TRATAMIENTOS SE EVALUARON MEDIANTE KRUSKAL-WALLIS SEGUIDO DE LA PRUEBA DE DUNN CON CORRECCIÓN FDR. SOLO SE MUESTRAN LOS CONTRASTES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES ($p < 0.05$) MEDIANTE CORCHETES.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo obtenido en el experimento podemos concluir que las PGPR nativas evaluadas tienen un impacto positivo y diferencial sobre la producción, la calidad nutracéutica y el control de enfermedades en tomate cultivado en invernadero, aunque su efecto sobre la morfología aérea y algunos atributos externos del fruto fue limitado. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en el rendimiento de frutos de tomate entre los tratamientos, destacando a ANBB48b con un incremento del 57.26% respecto al control; de igual forma, ANBB48b aumentó el número de frutos en 55.9%. Por otro lado, ANBB66 elevó el contenido de vitamina C en 23.82%, y ANBB6 incrementó la firmeza del fruto en 21.27%, lo que indica que distintas cepas ejercen efectos específicos sobre rendimiento, calidad nutracéutica y atributos postcosecha.

“Para las variables, altura de planta, diámetro de tallo y numero de ramas se realizó el análisis de datos donde los valores promedio y la desviación estándar $\pm$ SEM cm se muestran en la tabla 3; donde se puede observar que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos.” “Nuestro experimento arroja que el control mostró la mayor severidad de *Botrytis cinerea* en hojas infectadas, mientras que los tratamientos ANBB6, ANBB48b y ANBB45b redujeron significativamente la enfermedad.”

Los resultados indican además que el efecto de biocontrol observado fue sistémico, ya que la inoculación por *drench* en raíz redujo severidad de *Botrytis cinerea* en hojas superiores; la eficacia relativa fue ANBB6 > ANBB48b > ANBB45b, lo que refuerza la hipótesis de activación de mecanismos de defensa sistémica (ISR) por parte de estas cepas. En contraste, las variables morfométricas (altura, diámetro de tallo, número de ramas) y los atributos externos de calidad (diámetros polar y ecuatorial, °Brix, pericarpio) no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que sugiere que dichos rasgos están fuertemente condicionados por la genética del cultivar y/o por las condiciones de manejo nutricional del invernadero

Podemos señalar que ANBB48b es la candidata más prometedora para aumentar productividad (rendimiento y número de frutos) en invernadero. ANBB6 y ANBB48b

ofrecen además beneficios en sanidad (reducción de *Botrytis*), con ANBB6 como la cepa más efectiva en biocontrol en este ensayo. ANBB66 puede ser valiosa para mejorar calidad nutracéutica (vitamina C), también que selección de cepas debe orientarse al objetivo productivo (rendimiento, calidad nutracéutica, firmeza o control de enfermedades) y validarse localmente.

Podemos decir que también se presentan Limitaciones a lo cual es conveniente recomendar Validar la consistencia de los efectos en distintas temporadas y escalas de campo. Realizar estudios cuantificación de fitohormonas, actividad de enzimas de defensa, colonización rizosférica (CFU/g) y análisis de nutrientes en tejido para vincular causalidad.

Considerar pruebas de compatibilidad con programas fitosanitarios y escalado de formulaciones para aplicación práctica.

Cerramos mencionando que las cepas nativas estudiadas muestran un claro potencial como bioensayos sostenibles para la producción de tomate en la Comarca Lagunera: aumentan rendimiento y número de frutos, mejoran atributos de calidad nutracéutica y postcosecha en casos específicos, y reducen la severidad de *Botrytis cinerea* mediante mecanismos sistémicos. La adopción de estas PGPR, acompañada de validación local y estudios mecanísticos, puede contribuir a sistemas de producción más productivos y resilientes con menor dependencia de insumos químicos.

6. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

AbuQamar, S., Moustafa, K., & Tran, L.-S. (2016). 'Omics' and plant responses to *Botrytis cinerea*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01658> .

Armada E., Portela G., Roldan A., Azcon R. Combined use of beneficial soil microorganism and agrowaste residue to cope with plant water limitation under semiarid conditions. *Geoderma*. 2014;232:640–648.

Bastías, E., González, A., & Araya, M. (2016). Effect of *Pseudomonas fluorescens* inoculation on tomato growth and fruit quality under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 198(1), 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.022>

Bastías, E. & Holguín, C. (2016). *Nutritional management in tomato under greenhouse conditions*. *Revista de Ciencias Agrícolas*.

Bermejo, J. (2023). Botrytis en tomate – tratamiento convencional y ecológico. *Agrológica*. Recuperado de: <https://agrologica.es/blog/botrytis-tomate-tratamiento-ecologico/>

Benito, E. P., Arranz, M., & Eslava, A. P. (2000). *Factores de patogenicidad de Botrytis cinerea*. *Revista Iberoamericana de Micología*, 17(Suppl 1), S43–S46.

Blog Agricultura. (2026, marzo 7). Clima, suelo y agua para la producción del cultivo del tomate. Recuperado de <https://blogagricultura.com> 37(2), 201–215. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1902-1>

Calvo P., Nelson L.M., Kloepper J.W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*. 2014;383:3–41.

Cano-Hernández, P., Álvarez-Reyna, V. de P., Moreno-Reséndez, A., & Sáenz-Mata, J. (2016). *Inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum L.) bajo condiciones de invernadero* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Torreón, Coahuila, México.

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41.

Cano-Hernández, R., et al. (2016). *Efecto de biorreguladores del crecimiento sobre indicadores de calidad fisicoquímica en frutos de tomate cultivados en invernadero*. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Chapa Marmolejo, N. (2024). Título de la tesis [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional UAAAN. <https://www.repositorio.uaaan.mx:8080/handle/123456789/49939>

Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E. A. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9), 4951–4959.

Dean R. Van Kan J. A. L. Pretorius Z. A. Hammond-Kosack K. E. Di Pietro A. Spanu P. D. et al. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol.* 13, 414–430. doi: 10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x

ECAMED. (2024). *Botrytis cinerea – Ciclo de vida*. Ecología Agrícola del Mediterráneo. <https://ecamed.eu/botrytis-cinerea-ciclo-de-vida>

Espinosa-Palomeque, B., Jiménez-Pérez, O., Ramírez-Gottfried, R. I., Preciado-Rangel, P., Buendía-García, A., Zapata Sifuentes, G., Sariñana-Navarrete, M. A., & Rivas-García, T. (2025). Biocontrol of phytopathogens using plant growth promoting rhizobacteria: Bibliometric analysis and systematic review. *Horticulturae*, 11(3), 271. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030271>

Elad, Y., Vivier, M., & Fillinger, S. (2016). *Botrytis, the Fungus, the Pathogen and its Management in Agricultural Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23371-0>

Elad, Y., Pertot, I., & Prado, A. M. C. (2016). *Climate change effects on plant pathogens and plant diseases*. *Journal of Crop Improvement*, 30(3), 312–329.

ECAMED. (2024). *Botrytis cinerea – Ciclo de vida*. Ecología Agrícola del Mediterráneo.

<https://ecamed.eu/botrytis-cinerea-ciclo-de-vida> Benito, E. P., Arranz, M., & Eslava, A. P. (2000). *Factores de patogenicidad de Botrytis cinerea*. *Revista Iberoamericana de Micología*, 17(Suppl 1), S43–S46.

FAO (2020). Panorama de la agroindustria del tomate en América Latina.

FAO. (2001). *Greenhouse crop production: A guide to sustainable practices*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2019). *Greenhouse crop production: A guide to sustainable practices*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fernández-Ortuño, D., Chen, F., Schnabel, G., & Bryson, P. K. (2015). Resistance to multiple fungicides in *Botrytis cinerea* populations from strawberry fields in the southeastern United States. *Plant Disease*, 99(4), 446–452. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0479-RE>

Fillinger, S., & Elad, Y. (2016). *Botrytis – the Fungus, the Pathogen and its Management in Agricultural Systems*. Springer. (Herbario Virtual Fitopatología FAUBA, 2024).

García-López, J. et al. (2023). *Sustainable tomato production: nutrient management and microbial interactions*. *Journal of Applied Horticulture*.

González Rodríguez, G. (2016). *Efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre la calidad nutraceutica de los frutos de tomate (Solanum lycopersicum L.)*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Torreón, México.

Glick, B. R. (2012). *Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications*. Scientifica, 2012, 963401.

Gobierno de Mexico. Microorganismos benéficos que favorecen la fertilidad del suelo. https://www.gob.mx/inifap/articulos/microorganismos-beneficos-que-favorecen-la-fertilidad-del-suelo?utm_source=copilot.com

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: Universidad Autónoma de México.

García-Cervantes, M.A., Villagrana-Ortiz, P.J., Fraire-Velázquez, S. Sobresalientes Potencialidades de las Bacterias del Género *Bacillus* para el Biocontrol de Fitopatógenos y para Biorremediación: Outstanding Potential of *Bacillus* Genus Bacteria for Phytopathogen Biocontrol and Bioremediation. (2024). *Biotecnología Y Sustentabilidad*, 9(1), 36-55. <https://doi.org/10.57737/cn4jbm50>

Gashash, M., Al-Harbi, N., & Al-Saady, N. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria enhance yield and fruit quality of tomato under greenhouse conditions. *Plants*, 11(9), 1205. <https://doi.org/10.3390/plants11091205>

González-Fernández, R., et al. (2019). Crop protection against *Botrytis cinerea* by rhizosphere biological control using *Bacillus velezensis* XT1. *Biological Control*, 129, 45–54.

Hahn, M. (2014). The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi: *Botrytis* as a case study. *Journal of Chemical Biology*, 7(4), 133–141.

Hartmann, M. & Six, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4, 4–18 (2023)

Hahn, M. (2014). *The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi*: PortalFruticola.com. (2022). *Botrytis cinerea* en tomate. Recuperado de: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/08/02/botrytis-cinerea-en-tomate/>

Infoagro. (s.f.). Requerimientos de suelo y clima para el tomate. Recuperado en abril de 2026 de <https://infoagro.com>

Martínez-Valverde, I., Periago, M. J., Provan, G., & Chesson, A. (2002). Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(3), 323–330.

Mesmoudi, K., Baxevanou, C., Bartzanas, T., & Sethi, V. (2017). Microclimate management in greenhouses: Ventilation and humidity control. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(2), 45–56.

Martínez-Ferri, E., Medina, J. J., & Miranda, L. (2018). Condiciones de humedad y ventilación en el desarrollo de *Botrytis cinerea* en cultivos protegidos de tomate. *Agrociencia*, 52(4), 487–495.

López-Pérez, M., Lara-Ortiz, T., & Martínez-Bolaños, J. A. (2019). Estrategias integradas para el manejo de *Botrytis cinerea* en cultivos hortícolas. *Revista Mexicana de Fitopatología*,

Laboratorios A-L de México. (2024). Bacterias PGPR y fosfitos: Una alternativa sustentable para la nutrición y sanidad vegetal. Recuperado de laboratoriosaldemexico.com.mx Cómo

Luna Martínez, Laura, Martínez Peniche, Ramón A., Hernández Iturriaga, Montserrat, Arvizu Medrano, Sofía M., & Pacheco Aguilar, Juan R.. (2013). Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto en el crecimiento de tomate y pimiento. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(1), 63-69. Recuperado en 24 de abril de 2026,.

Sepúlveda, P., & Flores, P. (2025). Ficha técnica: Pudrición gris en tomate. Agrospec.

Charccahuana Sequera, A. (2024). Enfermedades del tomate. Instituto Idema.

Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P., & Van Kan, J. A. L. (2007). *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology*, 8(5), 561–580.

Botrytis as a case study. Journal of Chemical Biology, 7(4), 133–141

PortalFruticola.com. (2022). *Botrytis cinerea* en tomate. Recuperado de: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/08/02/botrytis-cinerea-en-tomate/>

Sarmiento, L. (2025). Control de Botrytis en tomates: métodos efectivos y sostenibles. Jardinería On. Recuperado de: <https://www.jardineriaon.com/botrytis-en-los-tomates.html>

Mazuecos-Aguilera, I., Anta-Fernández, F., Crespo-Barreiro, A., Martínez-Quesada, A., Lombana-Larrea, L., & González-Andrés, F. (2025). Plant growth-promoting rhizobacteria enhanced induced systemic resistance of tomato against Botrytis cinerea phytopathogen. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1570986. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1570986>.

Pavone, D. (2021). Botrytis cinerea: un hongo patógeno que amenaza los cultivos agrícolas. *Tecnovitaca*.

Sarmiento, L. (2025). Control de Botrytis en tomates: métodos efectivos y sostenibles. Jardinería On. Recuperado de: <https://www.jardineriaon.com/botrytis-en-los-tomates.html>

Ahemad, M., & Kibret, M. (2013). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University Science*, 5-20.

Ongena, M., & Jacques, P. (2008). Bacillus lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology*, 16(3), 115–125.

Raaijmakers, J. M., Paulitz, T. C., Steinberg, C., Alabouvette, C., & Moëgne-Loccoz, Y. (2009). The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1–2), 341–361.

Mazuecos-Aguilera, I., Anta-Fernández, F., Crespo-Barreiro, A., Martínez-Quesada, A., Lombana-Larrea, L., & González-Andrés, F. (2025). *Plant growth-promoting rhizobacteria enhanced induced systemic resistance of tomato against Botrytis cinerea phytopathogen*. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1570986>.

Jiang, M. T. et al. Home-based microbial solution to boost crop growth in low-fertility soil. *N. Phytol.* 239, 752–765 (2023).

Herrmann, L. & Lesueur, D. Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **97**, 8859–8873 (2013).

López, J. y Rodríguez, R. 2014. Agricultura biointensiva: método de agricultura sostenible para los microagricultores de México. *In: XVIII Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas.* 2434-2455 p.

Idema. (2024). *Enfermedades del tomate*. Idema Books.

Kaundal, S., Rana, N., Kumar, Y. K., Alhewairini, S. S., Barasarathi, J., Haron, F. F., & Rebouh, N. Y. (2025). Biofilmed multifarious rhizobacterial isolates of tomato rhizosphere of North-Western Himalayas promote plant growth in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1610707. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1610707>

Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. *Bacteria*, 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>

Modiba, M. P., Bell, T., & Babalola, O. O. (2025). Plant growth-promoting rhizobacteria and bacterial biocontrol agents in tomato disease management: Mechanisms, applications, and omics perspectives. *Global Challenges*, 9(12), e00320.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *FAOSTAT*. fao.org

Juárez-Maldonado Antonio, Karim de Alba Romenus, Zermeño González Alejandro, y Adalberto Benavides Mendoza. 2017. «Análisis De Crecimiento Del Cultivo De Tomate En Invernadero». *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 6 (5). México, ME:943-54. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i5.589>.

Pavone, D. (2021). *Botrytis cinerea: un hongo patógeno que amenaza los cultivos agrícolas*. Tecnovitaca. <https://tecnovitaca.com>

Pereira da Costa, J. H., Silva, D. J. H., & Fontes, P. C. R. (2014). Genetic parameters of tomato fruit quality traits in backcross populations. *Genetics and Molecular Research*, 13(2), 3187–3196. <https://doi.org/10.4238/2014.April.25.2>

QiG.ChenJ.ChangM.ChenH.HallK.KorinJ.et al. (2018). Pandemonium breaks out: disruption of salicylic acid-mediated defense by plant pathogens. *Mol. Plant*11, 1427–1439. doi: 10.1016/j.

SIAP (2023). Producción agrícola nacional: tomate. <https://www.gob.mx/siap>

Rodríguez-Romero, J., Hueso-Gil, A., & Calvo, A. M. (2020). *Botrytis cinérea* en cultivos de tomate bajo invernadero: fisiología, epidemiología y control. *Phytopathologia Mediterranea*, 59(1), 123–136. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-12348

Romanazzi, G., et al. (2016). *Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables. Postharvest Biology and Technology*, 122, 82–94.

Sun, D. Q., Hale, L. & Crowley, D. Nutrient supplementation of pinewood biochar for use as a bacterial inoculum carrier. *Biol. Fertil. Soils* **52**, 515–522 (2016).

Springer, L. (2021). Influence of PGPR and organic amendments on tomato yield and fruit quality. *Journal of Plant Nutrition*, 44(12), 1785–1798. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1874389>

TianS.LiuB.ShenY.CaoS.LaiY.LuG.et al. (2023). Unraveling the Molecular Mechanisms of Tomatoes' Defense against *Botrytis cinerea*: Insights from Transcriptome Analysis of Micro-Tom and Regular Tomato Varieties. *Plants*12, 2965. doi: 10.3390/plants12162965

Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, Ismail S, Nasrulhaq Boyce A. Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability-A Review. *Molecules*. 2016 Apr 29;21(5):573. doi: 10.3390/molecules21050573. PMID: 27136521; PMCID: PMC6273255.

Wang, N., Zhang, T., Li, Y., Cong, A., Lian, J., & Feng, K. (2025). Integrated application of fertilization increased maize (*Zea mays* L.) yield by improving soil quality, particularly

under limited water conditions in a semi-arid sandy area. *Agricultural Water Management*, 309, 109334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109334>.

Wang, X.; Zhou, X.; Cai, Z.; Guo, L.; Chen, X.; Chen, X.; Liu, J.; Feng, M.; Qiu, Y.; Zhang, Y.; et al. A Biocontrol Strain of *Pseudomonas aeruginosa* CQ-40 Promote Growth and Control *Botrytis cinerea* in Tomato. *Pathogens* **2021**, *10*, 22. <https://doi.org/10.3390/pathogens10010022>

Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P., & Van Kan, J. A. L. (2007). *Botrytis cinerea: the cause of grey mould disease. Molecular Plant Pathology*, 8(5), 561–580.

Xu, S. J., Park, D. H., Kim, J. Y., & Kim, B. S. (2016). Biological control of gray mold and growth promotion of tomato using *Bacillus* spp. isolated from soil. *Tropical Plant Pathology*, 41(2), 101–110. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0082-8> (doi.org in Bing)

ZhengL.GuX.XiaoY.WangS.LiuL.PanH.et al. (2023). Antifungal activity of *Bacillus mojavensis* D50 against *Botrytis cinerea* causing postharvest gray mold of tomato. *Sci. Hortic.* 312, 111841. doi: 10.1016/j.scienta.2023.111841

Zhou, Y., Liu, D., Li, F. et al. Superiority of native soil core microbiomes in supporting plant growth. *Nat Commun* **15**, 6599 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50685>.
