

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Rizobacterias promotoras del crecimiento y nanotubos de carbono en la producción
de tomate bajo invernadero

Por:

Guadalberto Antonio Olivares

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

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

Rizobacterias promotoras del crecimiento y nanotubos de carbono en la producción
de tomate bajo invernadero

Por:

Guadalberto Antonio Olivares

TESIS

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

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por:


Dr. José Rafael Paredes Jácome
Presidente


Dra. Nayelli Azucena Sígala Aguilar
Vocal Externo


Ph.D. Eduardo Emilio Madero Tamargo
Vocal


Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Vocal Suplente
Unidad Laguna


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



Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

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

Rizobacterias promotoras del crecimiento y nanotubos de carbono en la producción
de tomate bajo invernadero

Por:

Guadalberto Antonio Olivares

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. José Rafael Paredes Jácome
Asesor Principal

Dra. Nayelli Azucena Sígala Aguilar
Asesor Principal Externo

Ph.D. Eduardo Emilio Madero Tamargo
Coasesor

Dr. Luis Abraham Chaparro Encinas
Coasesor

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



Torreón, Coahuila, México

Diciembre 2025

DEDICATORIAS

Para mis padres

Dedico este trabajo a mi querido padre **Francisco Antonio Santiago** y a mi madre querida **Celestina Olivares Ortega**, quienes, con su amor incondicional, ejemplo de sacrificio y fortaleza, han construido el fundamento de mi formación y carácter. Su constante apoyo, confianza y valores inculcados han sido la luz que me ha guiado incluso en los momentos más difíciles. Este logro es tan suyo como mío, pues sin ustedes no habría sido posible alcanzar esta meta.

Para mis hermanos

A mis hermanos, compañeros inseparables y pilares de mi vida. Gracias por su comprensión, apoyo constante y por ser un refugio seguro en cada etapa de mi trayecto académico. Su ánimo y compañía fortalecieron mi espíritu y me recordaron siempre la importancia del vínculo familiar en la búsqueda de nuestros sueños.

Para mis familiares

A todos los familiares que, con su cariño, palabras de aliento y respaldo, contribuyeron a que pudiera avanzar firme hacia esta meta. A ustedes, gracias por ser una red de apoyo que me sostuvo en cada paso y supo celebrar cada pequeño logro.

Para mis amigos

A mis estimados amigos, cuya amistad sincera, consejos desinteresados y momentos compartidos de alegría y reflexión enriquecieron no solo estos años de estudio, sino toda mi vida. Su respaldo y estímulo fueron esenciales para mantener la motivación y el equilibrio ante los retos de esta travesía.

Para mi asesor principal

Con profundo respeto y gratitud dedico este trabajo a mi asesor principal, al **Dr. José Rafael Paredes Jácome**, cuyo conocimiento, paciencia y dedicación fueron faros orientadores en todo el proceso de investigación. Su rigurosidad académica y apoyo humano permitieron que esta obra alcanzara un nivel de calidad y profundidad que siempre me esforzaré por superar. Gracias por creer en mi potencial y acompañarme con sabiduría durante este camino.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres...

A mis queridos padres, cuyo amor infinito y apoyo constante han sido la fuerza que me sostuvo en cada paso de esta travesía académica. Gracias por creer en mí cuando yo dudaba, por sus sacrificios silenciosos y por brindarme siempre un hogar de confianza y esperanza. Este logro es un reflejo directo de su dedicación y de los valores que con tanto amor me inculcaron.

Hermanos...

A mis hermanos, compañeros inseparables en esta aventura de la vida. Su apoyo, palabras alentadoras y complicidad fueron el refugio que mantuvo viva mi motivación. Gracias por ser ejemplos de perseverancia y por recordarme que, más allá del esfuerzo individual, el vínculo familiar es la fuerza más poderosa para alcanzar nuestros sueños.

A mi universidad...

A mi universidad, alma mater que me otorgó no solo conocimientos, sino también la oportunidad de crecer como persona y profesional. Por cada aula, cada maestro, cada recurso y cada experiencia vivida en sus espacios, gracias por ser el escenario donde pude transformar mis ideas en acción y mi ilusión en realidad.

Al departamento de Horticultura...

Al Departamento de Horticultura, mi profundo reconocimiento por ser un espacio de aprendizaje y apoyo permanente. A cada profesor, investigador y colaborador, gracias por compartir su sabiduría, por el respaldo técnico y humano, y por fomentar el ambiente propicio para la creatividad y la excelencia científica.

A mi asesor principal

Con sincera gratitud, agradezco a mi asesor principal, cuya guía experta, paciencia y compromiso fueron esenciales para superar cada desafío que presentó este proyecto. Su confianza en mi capacidad y sus valiosos consejos fueron la luz que iluminó el camino en momentos de incertidumbre y agotamiento. Este triunfo también es suyo.

A mis amigos...

A mis amigos, tesoros de la vida, que compartieron conmigo risas, apoyo y comprensión a lo largo de este proceso.

Gracias a mis grandes amigos Ing. Antonio R., quien lo considero como uno de mis hermanos y al Ing. J. Yeudiel, quienes pude compartir momentos increíbles e inolvidables. A mis dos apreciadas amigas M. Itzel e Inés Z, por su amistad incondicional que me brindaron y por aquellos momentos juntos que pasamos. También quiero dar gracias a mi amiga y compañera Diana S. quien tuve la oportunidad de conocerla y haber compartido buenos momentos.

La presencia constante de cada uno de ellos me brindó equilibrio y alegría, recordándome que el éxito académico se construye también desde la amistad verdadera y la solidaridad sincera.

A mis maestros...

A mis maestros, fuente inagotable de conocimiento e inspiración. Su dedicación, paciencia y pasión por la enseñanza despertaron en mí el deseo constante de aprender y mejorar. Gracias por sembrar en mí la semilla del compromiso y la disciplina, que hoy cosecho con profundo agradecimiento.

A la vida...

A la vida, agradezco las experiencias, retos y aprendizajes que moldearon mi carácter y ampliaron mi perspectiva. Gracias por regalarme la oportunidad de crecer frente a la adversidad, por la fuerza para seguir adelante y por permitir que hoy celebre este logro que abre nuevos caminos hacia el futuro.

A mí...

Finalmente, pero no menos importante, quiero reconocer y agradecer a mí mismo por la perseverancia, disciplina y compromiso que mantuve a lo largo de este proceso. Por cada amanecer que elegí seguir adelante, aun cuando las dudas y el cansancio intentaron detenerme. Por ser mi propio motor en los momentos difíciles y confiar en mi capacidad para superar obstáculos. Por haber aguantado todas aquellas noches de desvelo, aquellos momentos sin tiempo libre. Por siempre creer en mí, por siempre tratar de hacer más bien que mal. Este logro representa no solo el fruto del esfuerzo externo, sino también el crecimiento interior y la voluntad firme que me llevaron hasta aquí. Gracias por no rendirte nunca y por construir con paciencia el camino hacia mis sueños.

ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
HIPÓTESIS	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Origen e historia del cultivo tomate	3
2.2 Evolución y popularización	3
2.3 Importancia del cultivo de tomate	4
2.3.1 Producción de ámbito Nacional	4
2.3.2 Producción de ámbito Mundial 2020 - 2024	6
2.4 Clasificación taxonómica del tomate	8
2.5 Características botánicas del cultivo de tomate	9
2.5.1 Sistema radical	9
2.5.2 Tallo	9
2.5.3 Hojas	10
2.5.4 Flores	10
2.5.5 Frutos	10
2.5.6 Semillas	11
2.6 Etapas fenológicas	11
2.6.1 Inicial:	11
2.6.2 Vegetativa:	11
2.6.3 Reproductiva:	12
2.6.4 Productiva:	12
2.7 Calidad nutracéutica del cultivo del tomate	12
2.8 Principales plagas y enfermedades en el cultivo de tomate	14
2.9 Nanotecnología en la agricultura	16

2.9.1 Avances en nanofertilizantes y nanopesticidas.....	17
2.9.2 Nanosensores y resistencia al estrés.....	17
2.9.3 Nanotubos de carbono	18
2.9.4 Nanotubos de carbono de pared múltiple.....	18
2.9.5 Investigaciones clave de los últimos años	19
2.9.6 Estudios específicos por año y cultivos	19
2.9.7 Impacto ambiental y desafíos futuros	20
2.10 Biofertilizantes	20
2.10.1 Avances en eficiencia de rendimientos.....	20
2.10.2 Estudios clave por período y mecanismos.....	21
2.10.3 Impacto en cultivos intercalados y sostenibilidad	21
2.10.4 Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal	21
2.10.5 Mecanismos de acción y beneficios en cultivos	22
2.10.6 Estudios clave de los últimos 10 años (2015-2025)	22
2.10.7 Avances por Año y Cepas.....	22
2.10.8 Impacto en sostenibilidad y desafíos	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 Ubicación del experimento	24
3.2 Material vegetal y siembra	24
3.3 Nanotubos de carbono	25
3.4 Material microbiológico.....	25
3.5 Manejo del cultivo	26
3.6 Descripción de los tratamientos	28
3.7 Variables agronómicas evaluadas	29
3.7.1 Variables agronómicas	29
3.7.2 Variables de calidad.....	31
3.8 Análisis estadístico.....	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 Rendimiento (g/planta)	32
4.2 Número de frutos por planta	32
4.3 Altura de planta	34
4.4 Diámetro de tallo	35
4.5 Biomasa fresca de la planta	36

4.6 Biomasa seca de la planta	38
4.7 Largo de raíz	39
4.8 Peso fresco de raíz	41
4.9 Peso seco de raíz	42
4.10 Vitamina C (mg/100 gr)	44
4.11 SST (° Brix).....	45
4.12 Firmeza (Kg/cm2)	46
5. CONCLUSIONES.....	48
6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción mundial de Tomate 2024.....	7
Tabla 2. principales componentes nutraceuticas del tomate.....	13
Tabla 3. Plagas, enfermedades y fisiopatías en tomate.....	14
Tabla 4. Productos fitosanitarios aplicados para control de plagas y enfermedades	28
Tabla 5. Descripción de tratamientos aplicados.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del experimento	24
Figura 2. Rendimiento por planta (g), obtenido en tomate con los diferentes tratamientos evaluados. Valores por encima del gráfico, representan el rendimiento total de 12 de plantas.....	32
Figura 3. Variable de numero de frutos por planta aplicando diferentes tratamientos.	33
Figura 4. Desarrollo de la altura de planta de tomate var. Mago, aplicando los diferentes tratamientos.	34
Figura 5. Diámetro de tallo bajo los tratamientos de las rizobacterias con una concentración de SN al 100% y al 70%, reflejando una disminución de diámetro con respecto al testigo.....	36
Figura 6. Biomasa fresca de planta de tomate obtenida con los diferentes tratamientos aplicados.	37
Figura 7. Obtención de biomasa seca en la planta de tomate a diferentes concentraciones de solución nutritiva.	38
Figura 8. Efecto de las rizobacterias y los nanotubos de carbono en el largo de raíz del tomate bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva.	40
Figura 9. Respuesta de la planta a los diferentes tratamientos aplicados para la variable de peso fresco de la raíz en tomate.....	41
Figura 10. Resultados obtenidos de peso seco de raíz con diferentes tratamientos en tomate.....	43
Figura 11. Contenido de vitamina C con diferentes tratamientos y concentraciones de solución nutritiva aplicados en tomate.....	44
Figura 12. Resultado de los sólidos solubles totales (SST) en tomate bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva aplicados a los tratamientos.	45
Figura 13. Firmeza obtenida en tomate var. Mago con aplicación de rizobacterias y nanotubos de carbono en concentraciones diferentes de solución nutritiva bajo invernadero.....	47

RESUMEN

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), una de las hortalizas más significativas desde el punto de vista económico y alimentario a nivel global. Por esta razón, es crucial investigar estrategias que mejoren su crecimiento, lo cual es esencial para sistemas agrícolas sostenibles. Entre las alternativas que han surgido se encuentran las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y los nanotubos de carbono (NTC), que han demostrado tener efectos beneficiosos en el desarrollo de las plantas al mejorar la disponibilidad de nutrientes, estimular el crecimiento de las raíces, modular las hormonas y aumentar la eficiencia fisiológica. Con el propósito de analizar el impacto tanto individual como combinado de las rizobacterias y los NTC pueden mitigar el impacto del estrés nutricional en el tomate bajo distintas concentraciones de solución nutritiva. El programa estadístico utilizado para realizar el análisis de varianza (ANVA) fue SAS 9.1 y se realizó la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$). Se utilizaron dos niveles de concentración de la solución nutritiva: 100% y 70%. En el primero incluyeron: un testigo sin aplicación (T1), aplicación de rizobacterias (T2), NTC (T3) y la combinación de rizobacterias con NTC (T4). En el segundo reducido de solución nutritiva (70%), los tratamientos fueron: rizobacterias (T5), NTC (T6) y la combinación de ambos (T7). La aplicación de las PGPR se realizó directamente en la rizosfera, mientras que los NTC se aplicaron mediante aspersión foliar en concentraciones previamente definidas. Este diseño experimental permitió comparar el rendimiento fisiológico y agronómico del cultivo y con disponibilidad reducida de nutrientes, evaluando cómo los NTC y las rizobacterias, tanto de manera individual como sinérgica.

En base a las variables evaluadas, se obtuvieron buenos resultados con las rizobacterias reduciendo la nutrición, en rendimiento superó al testigo en un 14.3%. de igual forma, al aumentar la nutrición, destaca en las variables de la raíz, superando al testigo y en combinación con los NTC también tuvieron buenos resultados.

Los resultados obtenidos a partir de esta metodología proporcionan una base sólida para entender la interacción entre biotecnologías emergentes y la nutrición vegetal, ofreciendo información valiosa para el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

Palabras clave: Bioestimulación, Solución nutritiva, Hidroponía, Respuesta, Rendimiento

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de los cultivos agrícolas ha tenido una gran revolución durante los últimos años, el descubrimiento de nuevas formas de producción y a la accesibilidad de nuevas tecnologías ha permitido el mejoramiento en el ámbito agrícola.

Una de las hortalizas con mayor importancia económica por todo el planeta debido a su alta demanda es el tomate rojo (*Solanum lycopersicum*), consumida como en fresco, congelado, seco y conservas, llegando así a una producción hortícola que simboliza más del 30% en el mundo (Nawab et al., 2017; Costa et al., 2018). Debido a la alta demanda anual de este fruto, también aumenta la superficie de siembra, que para la producción de tomate se utiliza una gigantesca cantidad de fertilizantes químicos y biocidas con la finalidad de afrontar las deficiencias nutricionales, el control y manejo de plagas, enfermedades y malas hierbas, engrandeciendo así los costos de producción, asumiendo un gran impacto negativo a la naturaleza (Watanabe et al., 2015; Mustafa et al., 2019).

El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) como los del género *Bacillus* spp. llega a ser una gran oportunidad para combatir el uso de fertilizantes sintéticos y productos químicos, que, gracias a sus capacidades de éstas mejoran las relaciones de los organismos y microorganismos en la rizosfera del suelo. Las rizo-bacterias dan un considerable beneficio a las plantas de tomate favoreciendo a la fijación de nitrógeno dispersado en el aire al suelo, actuando también como solubilizadores de fosfatos y secretar fitohormonas para el crecimiento exponencial de plantas. Gracias a las investigaciones que se han estado llevando a cabo durante estos últimos años, se ha declarado que géneros como *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus* y *Streptomyces* conforman la vida microbiana en la rizosfera del suelo en el cultivo de tomate (Alfonso et al., 2018).

En compensación, los nanomateriales como lo son los Nanotubos de Carbono (NTC), se ha llegado a demostrar que son efectivas en el control de ciertas enfermedades, así como también mejorar a la resistencia de las plantas frente a estrés abiótico y a tener una buena absorción de nutrientes. Los NTC tienen la capacidad de modificar el fenotipo de las plantas y la composición de la rizosfera de la tierra. Las plantas de tomate cultivadas en suelo suplementado con NTC producen el doble de flores y frutos en comparación con las plantas cultivadas en suelo (Khodakovskaya et al., 2013).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación de nanotubos de carbono y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el rendimiento y calidad de la producción de tomate (*Solanum lycopersicum*).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la interacción entre nanotubos de carbono y rizobacterias en parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de la planta.
- Comparar la calidad poscosecha y el rendimiento de la del tomate en tratamientos con nanotubos de carbono, rizobacterias y su combinación frente a un manejo convencional.

HIPÓTESIS

La aplicación conjunta de nanotubos de carbono y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal ejerce un efecto sinérgico que incrementa significativamente el rendimiento y la calidad del tomate, superando los resultados obtenidos con tratamientos individuales o convencionales.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen e historia del cultivo tomate

El tomate rojo o jitomate, cuyo nombre científico es *Solanum lycopersicum*, tiene un origen que se remonta a América del Sur y Mesoamérica. El tomate silvestre se originó en la región andina del norte del Perú y sur de Ecuador, específicamente en la var. cerasiforme, también conocida como tomate cherri. Sin embargo, estudios anteriores sugieren que la especie silvestre *Solanum pimpinellifolium* podría haber sido la precursora del tomate moderno (Blanca et al., 2015).

La domesticación del tomate se cree que ocurrió en el sureste de México hace unos 7000 años, dando lugar a la variedad *Solanum lycopersicum* var. *lycopersicum* (tomate moderno). Los aztecas, que vivían en Mesoamérica, fueron los primeros en cultivar y mejorar el tomate, conocido en su lengua como *xīctomatl* (en lengua Náhuatl) o "fruto con ombligo". Antes de la llegada de los españoles a México, la planta ya había tenido un gran avance con respecto a la domesticación, décadas más tarde en el Continente Europeo tuviese una etapa de domesticación mucho intenso en los siglos XIII y XIX dando así a una diversidad de características fenotípicas (Ruralcat, 2018).

Las últimas investigaciones han dado a conocer la domesticación del tomate rojo (*Solanum lycopersicum*) que tiene su origen en América del Sur, específicamente en Ecuador, donde se domesticó el tomate silvestre *Solanum pimpinellifolium* para dar lugar a una forma semidomesticada llamada *Solanum lycopersicum* var. cerasiforme (SLC). Posteriormente, esta variedad semidomesticada se extendió hacia Mesoamérica, particularmente en México, donde se integró la domesticación del tomate moderno, con características fenotípicas y genotípicas excepcionales y diversas adaptaciones agrícolas. México es reconocido como el centro mundial de domesticación del jitomate debido a esta etapa final de domesticación y diversificación realizada por los pueblos mesoamericanos (Razifard et al., 2020).

2.2 Evolución y popularización

En sus inicios, después del “descubrimiento” de América, en Europa, el científico Pietro Andrea Mattioli consideró venenoso este fruto debido a su pertenencia a la familia de las solanáceas, que contiene solanina, una neurotoxina. Sin embargo, en el siglo XVIII comenzó a consumirse ampliamente, especialmente en la cocina

mediterránea. En Gran Bretaña, su aceptación fue más lenta, pero para finales del siglo XVIII ya se había vuelto común en sopas y caldos. Hoy en día, el tomate es un ingrediente esencial en muchas cocinas del mundo, destacando por su versatilidad y valor nutricional, siendo una fuente importante de vitamina C y licopeno, un antioxidante con propiedades beneficiosas para la salud (Blanca, J., & Cañizares, J. 2022).

Dado el consumo que comenzaba a tener el tomate por esos años, el s. XX se caracterizó por el desarrollo industrial para la mejora de semillas, de resultas de ello, la endogamia y la selección de variedades tradicionales para los deshíbridos de alto rendimiento dieron lugar a variedades comerciales con muy poca diversidad genética y comercial (Schouten, 2019).

2.3 Importancia del cultivo de tomate

Desde tiempos inmemorables, el cultivo de tomate, perteneciente a la familia de las solanáceas (solanaceae) ha sido sustancial en la vida del ser humano, desde el cruce de fronteras hasta convertirse en uno de los cultivos de hortalizas mayormente producidos por todo el mundo, llegando a aumentar su demanda con el paso de los años. Además, ha otorgado una gran relevancia a la innovación al desarrollo tecnológico dentro de la agricultura (Kayess et al., 2020).

El cultivo en tomate en México ha destacado por sus grandes cantidades de siembra, llegando a generar un elevado número de oportunidades tanto para trabajadores y productores, siendo de importancia económica y social generalmente. Según datos recopilados del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), dentro de este mismo país, en los últimos años se ha estado incremento la explotación hacia esta hortaliza, comparado en el año 2020 al 2024 tuvo un incremento del casi 9%.

2.3.1 Producción de ámbito Nacional

El análisis del incremento en la superficie sembrada de jitomate en México entre 2020 y 2024 muestra una tendencia de crecimiento sostenido, especialmente en la agricultura protegida. Según datos del SIAP y estudios recientes, en 2024 la superficie destinada al cultivo de jitomate presentó un aumento del aproximadamente 4,8% respecto a 2023, alcanzando una superficie total de alrededor de 70,000 hectáreas.

2.3.1.1 Análisis comparativo de los años 2020-2024

- **2020:** La superficie sembrada de jitomate en México rondaba las 66,000 hectáreas, con un aumento anual moderado, impulsado por mejoras tecnológicas y mayor demanda tanto en mercado interno como en exportación.
- **2021-2022:** Se observó un incremento anual cercano al 3-4%, dada la expansión en cultivo en agricultura protegida y en zonas de alta rentabilidad.
- **2023:** La superficie sembrada continuó creciendo, con promedios del 4-5% anual, impulsada por condiciones económicas favorables y políticas de apoyo a la agroindustria.
- **2024:** Registro un incremento del 4,8%, consolidando la tendencia de expansión en superficie sembrada, especialmente en zonas de agricultura protegida y en estados como Sinaloa, San Luis Potosí y Michoacán (SIAP, 2025).

Esta tendencia refleja una mayor inversión en infraestructura agrícola, tecnologías de riego y producción intensiva, que contribuyen a la expansión controlada de la superficie de jitomate en México en los últimos años.

Sobre la base de datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en el 2024, los estados de México que produjeron la mayor cantidad de tomate rojo en 2024 fueron:

- Sinaloa, con una producción estimada de 774,811 toneladas, el principal productor nacional con alrededor del 19% de la producción total.
- San Luis Potosí, con aproximadamente 436,097 toneladas.
- Michoacán, con cerca de 356,776 toneladas.
- Jalisco, con alrededor de 211,716 toneladas.
- Morelos, con 201,721 toneladas.
- Baja California Sur, con 171,838 toneladas.

Estos seis estados representan una parte significativa de la producción nacional de tomate rojo en México en 2024, siendo Sinaloa el líder destacado debido a sus condiciones climáticas favorables, suelos ricos en nutrientes y técnicas agrícolas

avanzadas, contribuyendo con casi el 20% del total nacional. Además, la producción de estos estados es clave para el consumo interno y exportación (SADER, 2024).

2.3.2 Producción de ámbito Mundial 2020 - 2024

Según la FAO, la producción mundial de tomate en el año 2024 fue de aproximadamente 45,764 millones de kilos (45,764,000 toneladas), lo que representa un aumento del 3% respecto al año 2023. Esta cifra corresponde a tomate producido específicamente para la industria. Los principales países productores de tomate en 2024 fueron China, Estados Unidos (California), Italia y España. Esta información fue reportada en el Anuario estadístico de la FAO 2024 y respaldada por datos del Observatorio Tecnológico del Tomate.

Los principales países productores de tomate entre 2020 y 2024, junto con sus datos anuales más representativos, son los siguientes:

- China: el mayor productor mundial, con más de 68 millones de toneladas en 2022 y alrededor de 70 millones de toneladas en 2023 y 2024. La producción de China supera por mucho a la de cualquier otro país.
- India: segunda posición con más de 20 millones de toneladas al año en ese período.
- Turquía: tercero, con producción alrededor de 13 millones de toneladas anuales.
- Estados Unidos: aproximadamente 10 millones de toneladas, con California como principal región productora.
- Italia: cerca de 6 millones de toneladas en 2022.
- España: alrededor de 3.6 millones de toneladas, colocándose en la décima posición mundial en 2022.

Estos datos reflejan la producción en toneladas y han mostrado una tendencia de crecimiento moderado en la producción mundial de tomate en esos años.

Datos mundiales del tomate en 2024 (Tabla 1), incluyendo superficie sembrada, producción total y rendimiento (producción por metro cuadrado).

Tabla 1. Producción mundial de tomate 2024.

País/Región	Superficie sembrada (hectáreas)	Producción total (toneladas métricas)	Rendimiento (kg/m²)
Mundial	4,917,735	186.1 millones t	3.78
China	1,137,416	68.2 millones t	5.99
India	843,000	20.7 millones t	2.45
Turquía	158,719	13 millones t	8.19
Estados Unidos	106,757	10.2 millones t	9.55
Egipto	143,618	6.27 millones t	4.36
España	45,150	3.65 millones t	8.09
Países Bajos	1,820	0.77 millones t	42.31
Marruecos	14,956	1.39 millones t	9.28

- La superficie sembrada mundial (alrededor de 3.1 millones de hectáreas) y producción global (45.8 millones de toneladas métricas) representan un récord en 2024 según el World Processing Tomato Council (WPTC).
- El rendimiento promedio mundial es de aproximadamente 1.48 kg por metro cuadrado, con variaciones importantes según país y método de cultivo; Países Bajos destaca por un rendimiento excepcionalmente alto debido a la agricultura protegida avanzada (Observatorio Agroalimentario, 2024).

2.4 Clasificación taxonómica del tomate

El tomate, conocido también como jitomate o tomatera, pertenece a la familia Solanaceae, que agrupa especies con importancia agrícola como el chile, la papa y la berenjena. La especie cultivada más común es *Solanum lycopersicum* var. *lycopersicum*, que deriva de formas silvestres originarias de Sudamérica y la domesticación en México (Délices G. et al. 2019).

La clasificación taxonómica que se le ha atribuido al tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) En los últimos años, según diversos autores es la base para el estudio agronómico y fitotécnico para el tomate en su cultivo (Anthony B., 2025).

Dominio: Eucarya

Reino: Plantae

Sub-reino: Tracheobionta

Super-división: Spermatophyta

División: Angiospermae / Magnoliophyta

Clase: Eudicots / Dicotiledoneas / Magnoliopsida

Subclase: Asteridae

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Género: *Solanum*

Subgénero: *Potatoe*

Sección: *Petota*

Especie: *Solanum lycopersicum* L.

Nombre común: Tomate, jitomate.

(InfoAgro, 2023; USDA, 2025)

2.5 Características botánicas del cultivo de tomate

Las plantas de Tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) son plantas dicotiledóneas, perteneciente a la familia Solanaceae, generalmente se cultiva como una planta anual, compuesta por diversos órganos anatómicos que contribuyen a su crecimiento y desarrollo. La planta presenta las siguientes características botánicas de acuerdo con algunas investigaciones.

2.5.1 Sistema radical

Normalmente, la planta de tomate presenta un sistema radicular pivotante con una raíz primaria principal que se extiende verticalmente en el suelo. De esta raíz primaria se ramifican raíces laterales que se dispersan horizontalmente para absorber agua y nutrientes. Sin embargo, las plantas de tomate pueden desarrollar sistemas radiculares pivotantes o fibrosos, dependiendo del tejido del que se originen (Fornaris, 2016):

- Si la planta proviene de una semilla, desarrollará una raíz principal pivotante.
- Cuando crece a partir de una parte vegetativa (como esquejes), las raíces serán fibrosas.

Aproximadamente el 60% de las raíces se encuentran a 28 cm (11 pulgadas) de profundidad en el suelo. Estas estructuras cumplen funciones críticas:

1. Anclaje: La raíz primaria pivotante proporciona estabilidad a la planta.
2. Absorción: Actúa como canal principal para la captación de agua y nutrientes.

La raíz básica se desarrolla a partir de la radícula embrionaria. Las raíces laterales, más delgadas, surgen del periciclo (una capa celular del cilindro vascular o estela) y se extienden horizontalmente. Estas aumentan la superficie de absorción radicular, optimizando la capacidad de la planta para obtener recursos del suelo (Fornaris, 2016; Universidad de Puerto Rico).

2.5.2 Tallo

El tallo es semileñoso, anguloso, cubierto de tricomas simples y glandulares, con un grosor aproximado de 4 cm en la base. Tiene dos hábitos de crecimiento: determinado (crecimiento limitado) e indeterminado (crecimiento continuo sin límite visible). Los

tallos presentan segmentos con tres hojas y una inflorescencia, y terminan en un ápice vegetativo con ramificación simpodial (Universidad de Chile, 2013; Fornaris, 2016).

2.5.2.1 Por su hábito de crecimiento

La planta es herbácea, perenne en su estado natural, pero se cultiva normalmente como anual debido a la sensibilidad a heladas. Presenta dos tipos principales de hábito: indeterminado (crecimiento extendido, tallos postrados sin límite) y determinado (crecimiento limitado con formación más compacta). Esta plasticidad permite adaptación a diversos ambientes (Fornaris, 2016; Délices et al., 2019).

2.5.3 Hojas

Las hojas son alternas, pecioladas, de 10 a 50 cm de longitud, bi-pinatisectas (divididas en folíolos), y tienen una densa pubescencia de tricomas que protege contra plagas y desecación (Universidad de Chile, 2013; Agroes, 2013).

2.5.4 Flores

Son flores perfectas, hermafroditas, hipóginas y regulares, que consta de 5 o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo y dispuestos de forma helicoidal a intervalos de 135° que crecen con el fruto, estambres cuyos granos de polen forman un cono protector del estilo y ovario.

Las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racemoso. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. La flor se une al eje floral por medio de un pedicelo articulado que contiene la zona de abscisión, que se distingue por un engrosamiento con un pequeño surco originado por una reducción del espesor del córtex. Las inflorescencias se desarrollan cada 2-3 hojas en las axilas y están agrupadas en racimos con 3 a 10 flores (Universidad de Chile, 2013).

2.5.5 Frutos

El fruto o baya bio-plurilocular carnoso, jugoso, de forma variable (globosa, piriforme, achataada) y más de 2 cm de diámetro, de color rojo al madurar, pero puede ser rosada o amarillenta. Su estructura es plurilocular con numerosas semillas aplanas y amarillentas.

La forma y tamaño del fruto están controlados por múltiples loci genéticos, reflejando alta variabilidad fenotípica. El fruto puede recolectarse separándolo por la zona de abscisión del pedicelo, como ocurre en las variedades industriales, en las que es indeseable la presencia de parte del pecíolo, o bien puede separarse por la zona peduncular de unión al fruto (Mata-Nicolas et al., 2021; Agroes, 2013).

2.5.6 Semillas

Son numerosas en el interior del fruto, aplanadas y de color amarillento. Presentan alta viabilidad y germinación bajo condiciones óptimas, y su morfología puede variar dependiendo de la variedad. Son fuente de material genético para selección y mejoramiento de cultivares (Mata-Nicolas et al., 2021).

2.6 Etapas fenológicas

Las etapas fenológicas del cultivo de tomate comprenden varias fases de desarrollo desde la germinación hasta la cosecha (ciclo de vida), cada una con características específicas. Dependiendo de la etapa fenológica de la planta, así son sus demandas nutricionales, necesidades hídricas, susceptibilidad o resistencia a insectos y enfermedades.

2.6.1 Inicial:

Germinación: Comienza con la germinación de la semilla que dura aproximadamente de 5 a 10 días. Durante esta etapa, la radícula emerge primero, seguida por el hipocótilo que se eleva sobre la superficie del suelo. La temperatura óptima está entre 20 y 25 °C para favorecer el proceso. La planta invierte su energía en la síntesis de nuevos tejidos de absorción y fotosíntesis (BlogAgricultura, 2025).

Plántula: La planta desarrolla las primeras hojas verdaderas, estableciéndose para un crecimiento vigoroso. El desarrollo radicular avanza y la parte aérea comienza a crecer activamente.

2.6.2 Vegetativa:

Crecimiento vegetativo: La planta incrementa su tamaño, con formación de tallos, hojas y raíces. Se prepara para la floración. Esta fase dura varias semanas y requiere altos aportes nutricionales y de agua. Esta etapa se inicia a partir de los 21 días después de la germinación. Requiere de mayores cantidades de nutrientes para

satisfacer las necesidades de las hojas y ramas en crecimiento y expansión (AgronoBlog, 2025).

2.6.3 Reproductiva:

Floración: Aparición y desarrollo de flores, típicamente en racimos. Es crucial para la formación de frutos. La floración puede durar varias semanas dependiendo de la variedad y condiciones ambientales. Se inicia a partir de la fructificación, dura entre 30 a 40 días, y se caracteriza porque el crecimiento de la planta disminuye y los frutos extraen los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración (InfoAgronomo, 2023).

2.6.4 Productiva:

Fructificación: Desarrollo y maduración de los frutos. Los frutos pasan por etapas de crecimiento, cambio de color y maduración, donde se destacan cambios fisiológicos y bioquímicos que afectan la calidad y el sabor.

Cosecha: Momento en que los frutos alcanzan el tamaño y color ideales para la recolección. Se realiza manual o mecanizada-mente según el cultivo y se prepara para comercialización o procesamiento.

Estas etapas son monitorizadas usualmente con la escala fenológica BBCH adaptada para tomate, que detalla los estadios con códigos específicos para facilitar el manejo agrícola y evaluaciones científicas (AgronoBlog, 2025).

2.7 Calidad nutracéutica del cultivo del tomate

El Tomate ha sido un elemento muy notable en el consumo de las personas, ideal para mantener una ingesta adecuada por las buenas substancias que ya hacen dentro de este fruto, principalmente minerales, vitaminas, fibras, carotenoides y polifenoles (Chaudhary et al., 2018).

Con base en estudios, la calidad nutracéutica del tomate rojo se caracteriza principalmente por su contenido en compuestos bioactivos como licopeno, vitamina C, folato, carotenoides, polifenoles y fibra, todos con propiedades antioxidantes y beneficios para la salud. El licopeno es el compuesto más destacado por su efecto antioxidante, prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer y otras enfermedades crónicas. Además, el tomate rojo contiene vitaminas A y C, minerales

como potasio, magnesio y otros micronutrientes esenciales que contribuyen a su valor nutracéutico (Navarro-González I. et al., 2016).

Tabla 2. principales componentes nutraceuticas del tomate

Componente	Contenido aproximado	Beneficios nutracéuticos
Licopeno	Hasta 12.2 mg/100 g	Antioxidante, reduce riesgo de cáncer y enfermedades cardiovasculares
Vitamina C	13.2 - 28.2 mg/100 g	Antioxidante, favorece sistema inmune y piel
Folato (Vitamina B9)	1.93 - 6.44 µg/100 g	Esencial para el metabolismo y síntesis de ADN
Polifenoles	Variables según el tipo de tomate	Actividad antioxidante y antiinflamatoria
Carotenoides (otros que licopeno)	Presentes en cantidades menores	Antioxidantes, protectores celulares
Fibra	Presente en cantidades funcionales	Mejora digestión y salud metabólica
Minerales (K, Mg, Zn, Cu, Mn)	Diversos, en cantidades variables	Importantes para función celular y balance mineral

(CIAD, 2020).

Estos compuestos se encuentran en mayor concentración en el tomate rojo maduro, y su consumo aporta protección frente al estrés oxidativo y puede ayudar a reducir la incidencia de enfermedades crónicas como las cardiovasculares y ciertos tipos de

cáncer. Además, diferentes variedades de tomate presentan variaciones en su contenido nutracéutico, siendo el tomate RAF uno de los que muestra mayor calidad en compuestos bioactivos (Salas-Pérez L. et al., 2016; CIAD, 2020).

Investigaciones de 2022 confirman que el licopeno y azúcares reductores en tomate rojo mejoran con N ($10\text{-}16 \text{ molc m}^{-3}$) y K ($5\text{-}13 \text{ molc m}^{-3}$), potenciando beneficios cardiovasculares y anticancerígenos (Salazar-García, S., et al., 2022). Una reseña de 2022 del autor Collins y otros colaboradores detalla cómo el consumo regular reduce riesgos de cáncer y enfermedades coronarias vía inhibición de peroxidación lipídica.

2.8 Principales plagas y enfermedades en el cultivo de tomate

Tabla 3. Plagas, enfermedades y fisiopatías en tomate

Nombre común y científico	Descripción del daño
Plagas	
Gusanos de alambre (<i>Agriotes</i> spp.)	Ataca raíces de la planta.
Mosca blanca (<i>Trialeurodes vaporariorum</i> - <i>Bemisia tabaci</i>)	Larvas en envés de hojas, debilitan plantas y vectorizan virus.
<i>Pulgones</i> (<i>Aulacorthum solani</i> - <i>Aphis gossypii</i>)	Succión de savia y vectores de virosis.
Trips (<i>Frankliniella accidentalis</i>)	Ataques graves difíciles de controlar.
Araña roja (<i>Tetranychus cinnabarinus</i>)	Amarilleamiento foliar con colonias rojizas visibles.

Nombre común y científico	Descripción del daño
Enfermedades	
Acariosis (<i>Vasates lycopersici</i>)	Manchas brillantes en envés, necrosis y caída foliar en avance.
<i>Hongos vasculares (Fusarium oxysporum, Verticillium albo-atrum)</i>	Destruyen haces vasculares, marchitez.
<i>Mildiu (Phytophthora infestans)</i>	Manchas amarillas con necrosis y desecación completa.
<i>Alternaria (Alternaria solani)</i>	Manchas negruzcas rodeadas de halo amarillo en hojas.
<i>Chancro bacteriano</i>	Marchitez y necrosis de tallos y peciolos.
<i>Bacteriosis (Xanthomonas spp., Pseudomonas spp.)</i>	Manchas en hojas y tallos.
Fisiopatías	
<i>Heladas y granizos</i>	Daño físico a plantas y frutos.
<i>Asoleamiento o planchado</i>	Manchas blanquecinas en fruto por exceso de sol.
<i>Lluvias excesivas</i>	Afectan polinización, provocan rajados y favorecen hongos y bacterias.

Nombre común y científico	Descripción del daño
Vientos cálidos y secos	Causan caída de flores y frutos jóvenes.
Necrosis apical (blossom-end-rot)	Zonas blancas y necróticas en frutos, por deficiencias hídricas/nutricionales.
Agrietado del fruto	Grietas alrededor del pedúnculo por desequilibrios hídricos y otros factores.
Frutos huecos	Fecundación deficiente por bajas temperaturas o fitoreguladores.
Enrollamiento fisiológico de hojas	Posiblemente por poda excesiva o humedad.
Cuello amarillo	Franja amarilla en base del fruto.
Deformación y decoloración de frutos	Relacionadas con causas ambientales o de manejo.

(INRAE Ephytia, 2023; Bioprotection Portal, 2025)

2.9 Nanotecnología en la agricultura

La población mundial superó los 8 mil millones en 2022, y debido a este incremento con respecto a los años anteriores, las proyecciones sugieren que alcanzará más de 9.7 mil millones para 2050, según las Naciones Unidas (Jain et al., 2023). Este crecimiento implica un aumento del 50-80% en las necesidades de producción de cultivos a nivel mundial para 2050 (Lowry et al., 2019). Incluso con los avances agrícolas actuales, como semillas mejoradas, fertilizantes y agroquímicos, se espera que la producción mundial de granos alcance los 3.1 mil millones de toneladas para

2050, lo que aún podría no ser suficiente para satisfacer las demandas nutricionales globales (Alexandratos y Bruinsma, 2012).

Los métodos agrícolas tradicionales han experimentado una eficiencia decreciente, y el crecimiento de la producción mundial de granos se ha ralentizado desde el año 2000 (Hu et al., 2022; Lowry et al., 2019). Factores como la disminución de la tierra cultivable, la escasez de agua, el cambio climático, la reducción de la resistencia de los cultivos y la degradación ambiental son todas amenazas significativas para la seguridad alimentaria mundial (Adisa et al., 2019; Lowry et al., 2019; Zhao et al., 2022). Como resultado, la creación de tecnologías agrícolas alternativas sostenibles, de alta eficiencia y de bajo riesgo se ha convertido en un importante foco de la investigación internacional y un desafío significativo.

La nanotecnología transforma la agricultura al mejorar la eficiencia de nutrientes, control de plagas y resistencia al estrés mediante nano-fertilizantes, nano-pesticidas y nanosensores, reduciendo impactos ambientales. Estudios recientes destacan aumentos en rendimientos de hasta 70% con nanotubos de carbono y mayor eficiencia en el uso de nitrógeno.

2.9.1 Avances en nanofertilizantes y nanopesticidas

Investigaciones de 2023-2025 muestran que nanopartículas de óxido de zinc y hierro promueven el crecimiento vegetal, mejoran la fotosíntesis y reducen la lixiviación de suelos en cultivos como trigo y maíz. Nano-emulsiones de aceites esenciales selectivamente controlan malezas sin dañar cultivos, mientras que nanocarriers poliméricos liberan agroquímicos de forma controlada, minimizando toxicidad.

Pagano et al. (2025) revisan cómo nanopartículas biopoliméricas como quitosán reducen infecciones fúngicas en trigo hasta 60%, y dendrímeros mejoran la movilidad de fertilizantes foliares.

2.9.2 Nanosensores y resistencia al estrés

Análisis bibliométricos identifican nanosensores para monitoreo en tiempo real de nutrientes y estrés abiótico, con clústeres clave en aplicación foliar de nanopartículas de silicio para eficiencia hídrica. Luo et al. (2025) destacan tendencias en nano-fertilizantes que activan resistencia sistémica adquirida y sistemas antioxidantes en plantas.

2.9.3 Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras nanométricas cilíndricas derivadas del grafeno que mejoran la eficiencia en cultivos al facilitar la absorción de nutrientes y el transporte de agroquímicos, reduciendo pérdidas por lixiviación y aumentando rendimientos en un 10-30% en especies como maíz y trigo (Arumugam et al., 2025). Su alta conductividad eléctrica y área superficial permiten una liberación controlada de fertilizantes, promoviendo un crecimiento radicular más eficiente y resiliencia ante estrés abiótico (Shi et al., 2023). En los últimos 10 años, su aplicación ha evolucionado hacia prácticas sostenibles, minimizando el impacto ambiental en suelos degradados (Raliya et al., 2019).

2.9.4 Nanotubos de carbono de pared múltiple

Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) consisten en múltiples capas concéntricas de grafeno enrolladas en forma cilíndrica, ofreciendo propiedades mecánicas excepcionales como alta resistencia y módulo elástico comparable al diamante, junto con conductividad térmica y eléctrica superior (Diaz Varela et al., 2024).

Los NTC de pared múltiple (MWNTC) poseen diámetros de 1-100 nm, fuerza de tracción superior a 100 GPa y conductividad térmica elevada, lo que optimiza la retención de agua y nutrientes como N, P y K en suelos, elevando la actividad enzimática microbiana (Arumugam et al., 2025). Estas propiedades a nanoscala penetran membranas radiculares sin dañar células, regulando genes transportadores como NRT1 y NRT2 para mejorar la asimilación de nitrato en hasta 86% a dosis de 200 µg/mL (Shi et al., 2023). En cultivos actuales, combinados con nano-fertilizantes, reducen el uso de insumos químicos en un 20-50%, alineándose con agricultura de precisión (Giraldo et al., 2022).

Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) mejoran el crecimiento vegetal y la fitorremediación en suelos contaminados con metales pesados como cadmio (Cd) y níquel (Ni), promoviendo la germinación de semillas y el vigor radicular en arroz (*Oryza sativa L.*) a concentraciones de 1000 mg kg⁻¹, al estabilizar metales y reducir su acumulación en un 23.89% para Cd y 35,53% para Ni (Wang et al., 2025). Estos nanotubos estimulan la actividad de enzimas antioxidantes y equilibran iones

Na^+ y K^+ en plantas bajo estrés, incrementando la biomasa y la diversidad microbiana rizosférica (Wang et al., 2025). Además, fomentan la eficiencia en el uso de nutrientes como nitrógeno en manzano (*Malus hupehensis*), elevando la absorción y actividad de nitrato reductasa (NR) mediante la penetración en raíces (Shi et al., 2023).

En condiciones de sequía, los MWCNT inducen tolerancia en cultivos al aumentar la longitud de raíces y brotes, mejorando la fotosíntesis y el contenido de clorofila en maíz y arroz (Hadebe, 2025). Aplicados vía cebado de semillas a 150-200 $\mu\text{g/mL}$, potencian altura de plantas y número de hojas bajo estrés, apoyando el rendimiento en suelos pobres (AZoNano, 2025). Combinados con *Bacillus* spp., alivian deficiencias de macro y micronutrientes, coordinando metabolismo de carbono y nitrógeno para mayor biomasa en maíz (Luo et al., 2022).

2.9.5 Investigaciones clave de los últimos años

Entre 2019-2023, estudios demostraron que MWNTC incrementan la longitud radicular en 34%, puntas radiculares en 58% y biomasa aérea en 64% en *Malus hupehensis*, correlacionando con mayor actividad de nitrato reductasa (63%) y proteínas solubles (136%) (Shi et al., 2023). En 2022, revisaron confirmaron su rol en ingeniería vegetal para entrega de pesticidas y nutrientes, mejorando la nodulación en leguminosas y fotosíntesis bajo déficit hídrico (Giraldo et al., 2022). Publicaciones de 2024-2025 destacan remediación de suelos contaminados y elevación de rendimientos en arroz y vegetales mediante modificación superficial de NTC para biocompatibilidad (Arumugam et al., 2025; Pandey et al., 2019).

2.9.6 Estudios específicos por año y cultivos

En 2019, aplicaciones de NTC en cultivos industriales mejoraron rasgos comerciales como rendimiento y resistencia a plagas vía nanotecnología, reduciendo la fitotoxicidad a bajas dosis (Pandey et al., 2019). Para 2022, experimentos mostraron penetración radicular confirmada por microscopía Raman, potenciando el metabolismo CN en plantas transgénicas (Giraldo et al., 2022). En 2023, ensayos con $^{15}\text{N-KNO}_3$ revelaron distribución preferencial a hojas (42%) y eficiencia N global del 86%, ideal para frutales (Shi et al., 2023). Revisiones 2025 enfatizan NTC en suelos salinos, incrementando productividad en tomates y papayas en 25-40% (Arumugam et al., 2025).

2.9.7 Impacto ambiental y desafíos futuros

Los NTC encapsulan pesticidas para liberación lenta, preservando microbiota edáfico y reduciendo el escorrimiento en un 70%, fomentando la sostenibilidad (Arumugam et al., 2025). Sin embargo, dosis >500 µg/mL inducen estrés oxidativo, requiriendo un monitoreo toxicológico a largo plazo (Raliya et al., 2019). Futuras investigaciones priorizan síntesis verde de residuos agrícolas para escalabilidad en cultivos como tomate y papaya (Giraldo et al., 2022).

2.10 Biofertilizantes

Los biofertilizantes, compuestos por microorganismos vivos como bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), han surgido como clave alternativa a fertilizantes químicos, mejorando la productividad agrícola en un 10-30% y la salud del suelo en los últimos 10 años (Pérez-Bernal et al., 2025). Estudios sistemáticos de 2015-2025 destacan su papel en la fijación de N, solubilización de P y producción de fitohormonas, reducción de insumos sintéticos en cultivos como cereales y leguminosas (Gómez-Quintero et al., 2023). India y China lideran publicaciones, con 56% de artículos entre 2018-2020 enfocados en consorcios microbianos para mayor eficiencia (Gómez-Quintero et al., 2023).

2.10.1 Avances en eficiencia de rendimientos

Entre 2019-2025, los biofertilizantes incrementaron rendimientos en monocultivos e intercalados en 23% promedio, elevando la eficiencia de uso de la tierra (LER) de 1.01 a 1.17 en sistemas semiáridos con mijo africano y leguminosas como gandul y caupí (Pérez-Bernal et al., 2025). Las inoculaciones con HMA (*Rhizophagus fasciculatus*) y PGPR (*Pseudomonas* sp.) aumentan la colonización radicular en un 44% para cereales y biomasa en un 21% en cultivos intercalados en hileras, independientemente de los arreglos espaciales (Pérez-Bernal et al., 2025). Las revisiones confirman mejoras en productividad de cereales, hortalizas y frutas vía

mecanismos como sideróforos y antibióticos, sustituyendo parcial fertilizantes químicos (Gómez-Quintero et al., 2023).

2.10.2 Estudios clave por período y mecanismos

De 2018-2023, consorcios bacterianos y fúngicos elevaron rendimientos en 20-42% en cultivos intercalados FM x PP, con respuestas de crecimiento micorrílico positivo en leguminosas (45% MGR para caupí) bajo 50% RDF (Pérez-Bernal et al., 2025). En 2023-2025, investigaciones en trópicos secos mostraron densidad de esporas +70% en leguminosas y LER >1.33 en arreglos de mosaico, mitigando el estrés hídrico vía redes micorrílicas comunes (Pérez-Bernal et al., 2025). Publicaciones destacan nano-biofertilizantes para liberación controlada, mejorando nodulación y fotosíntesis en arroz y trigo (Areej, 2024).

2.10.3 Impacto en cultivos intercalados y sostenibilidad

Biofertilizantes en cultivos intercalados superan monocultivos en 19-29% de rendimiento, con mayor estabilidad en sitios arcillosos vía facilitación inter-específica y mayor diversidad microbiana (Pérez-Bernal et al., 2025). Reducen la escorrentía química y mejoran estructura edáfica, promoviendo la agroecología en tierras secas con menor huella ambiental (Gómez-Quintero et al., 2023). Los desafíos incluyen escalabilidad y sensibilidad al almacenamiento, pero avances en formulaciones líquidas impulsan la adopción global (Editorial do So, 2023).

2.10.4 Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) son microorganismos rizosféricos como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Azotobacter* que colonizan raíces, fijan nitrógeno, solubilizan fósforo y producen fitohormonas, incrementando rendimientos en 20-50% en cultivos como tomate y arroz durante 2015-2025 (Esquivel-Cote et al., 2018). Estudios recientes destacan mecanismos directos como síntesis de auxinas (AIA) y giberelinas, junto a indirectos como sideróforos y reducción de etileno vía ACC desaminasa, mejorando la tolerancia a salinidad y sequía (Esquivel-Cote et al., 2018). En la última década, su uso en inoculantes ha evolucionado hacia consorcios multiespecie para agricultura sostenible (AGROSAVIA, 2023).

2.10.5 Mecanismos de acción y beneficios en cultivos

Las PGPR como *Bacillus subtilis* y *Microbacterium sp.* aceleran germinación y elongación radicular mediante auxinas y citoquininas, elevando biomasa en yuca y arroz en 30-40% vía biopelículas y producción de giberelinas (Gómez et al., 2017). En alfalfa (*Medicago sativa*), cepas de *Pseudomonas* aumentan pigmentos fotosintéticos (97,9%), altura y peso seco bajo estrés por Cu y aguas residuales (Flores-Duarte et al., 2023). Investigaciones 2016-2023 confirman que *Azotobacter chroococcum* mitiga salinidad sódica en algodón y ají, promoviendo crecimiento vía fijación N y oxidación sulfuros (AGROSAVIA, 2023).

2.10.6 Estudios clave de los últimos 10 años (2015-2025)

De 2016-2018, ensayos mostraron *Enterobacter aerogenes* y *Bacillus mycoides* favoreciendo el rendimiento de arroz y chícharo mediante elongación de tallos y raíces, con *E. aerogenes* como la más efectiva (Gómez et al., 2017). En 2018, revisión en Colombia identificaron PGPR tolerantes a metales pesados, incrementando permeabilidad radicular y resistencia a patógenos como *Fusarium oxysporum* en tomate (Esquivel-Cote et al., 2018). Estudios 2021-2023 en AGROSAVIA revelaron *B. thuringiensis* como insecticida y promotor vía biopelículas máticas, extendiendo aplicaciones a no leguminosas (AGROSAVIA, 2023).

2.10.7 Avances por Año y Cepas

- **2017-2018:** *Microbacteria sp.* acelera germinación en Poaceae y Cyperaceae (Esquivel-Cote et al., 2018).
- **2023:** *Pseudomonas JD-14* eleva fotosíntesis en alfalfa 97,9% (Flores-Duarte et al., 2023).
- **2023:** *B. subtilis* forma biopelículas para promoción en múltiples cultivos (AGROSAVIA, 2023).

2.10.8 Impacto en sostenibilidad y desafíos

PGPR reduce el uso de químicos en un 80%, promoviendo la agricultura sustentable mediante competencia rizosférica y resistencia sistémica inducida (Esquivel-Cote et

al., 2018). Los desafíos incluyen colonización efectiva y escalabilidad, resueltos con técnicas moleculares para cepas competitivas en *Rhizobium* (Esquivel-Cote et al., 2018). Futuras perspectivas integran PGPR con nanotecnología para mayor eficiencia en trópicos (AGROSAVIA, 2023).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el Estado de Coahuila, dentro de la región de la Laguna, específicamente dentro de las instalaciones de la UAAAN-UL, dentro de los invernaderos del Departamento de Horticultura. La Universidad se encuentra 25°33'17.5"N 103°22'28.4"W, con una altitud que ronda los 1,123 msnm. Se ubica a un lado del Periférico Raúl López Sánchez colindando con la Carretera Santa Fe, dentro de la Ciudad de Torreón, Coahuila, México (**Fig. 1**).

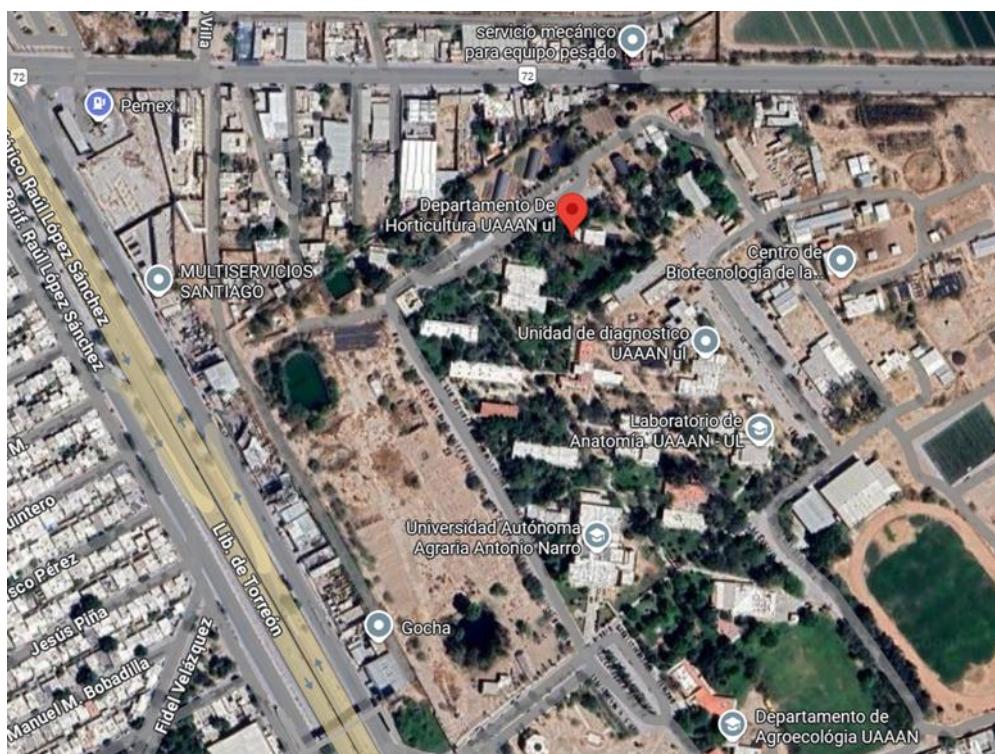


Figura 1. Ubicación del experimento

3.2 Material vegetal y siembra

Como material vegetal se utilizaron semillas de la Variedad Mago F1. Esta variedad de tomate Saladette indeterminado que se caracteriza por su alta calidad de frutos y una planta sana y vigorosa. Destaca por su vigor equilibrado, excelente sanidad y alto potencial de rendimiento.

3.3 Nanotubos de carbono

La aplicación de nanotubos de carbono en la agricultura se ha explorado debido a las propiedades únicas de estos nanomateriales, como su alta superficie específica, conductividad y capacidad para interactuar con microorganismos y plantas.

En el caso específico de este experimento, de una suspensión de 0.1 gramos de nanotubos de carbono en un litro de agua desionizada, empleando un sonicador para dispersarlos adecuadamente, se logra una distribución homogénea de las partículas. Ya en el experimento, la aplicación de los nanotubos de carbono se realizó con un aspersor, cubriendo el área foliar de la planta en donde se requería en base al tratamiento.

- Los nanotubos de carbono (0.1 g/L) se dispersan en agua desionizada con un sonicador y se aplican a razón de mejorar la absorción y protegiendo la raíz.

3.4 Material microbiológico

Las Rizobacterias del género *Bacillus* spp. han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para promover el crecimiento vegetal y controlar patógenos. Un concentrado aplicado a razón de 3.16 ml por litro de agua, con un volumen total de 25 ml por planta, permite inocular la rizosfera eficientemente. Estas bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR), fueron proporcionadas por el laboratorio de microbiología del Departamento de Horticultura de Unidad Saltillo, las cuales fueron aisladas de rizosfera de suelos áridos.

- *Bacillus* spp. en concentración de 3.16 ml/L se utilizó 25 ml/planta, promoviendo crecimiento, nutrición y defensa biológica.

3.5 Manejo del cultivo

Durante las fases de desarrollo de la planta se estuvieron realizando labores esenciales para el buen manejo y desarrollo de esta.

Preparación del Sustrato

La preparación del medio de cultivo fue a base de arena y perlita con una concentración de 70% arena y 30% perlita ajustando pH del agua de riego y nutrientes para un óptimo enraizamiento inicial de las plántulas.

Siembra y Germinación

Las semillas fueron colocadas en una charola germinadora de 200 cavidades, el sustrato utilizado fue Peat moss.

Trasplante

Se traslada las plántulas al invernadero a las 5 semanas, espaciéndolas adecuadamente para evitar competencia de luz.

Tutorado

La instalación de tutores fue de rafia para sostener el tallo principal y racimos, guiando el crecimiento vertical y facilitando la cosecha.

Poda

Se realizó la eliminación selectiva de hojas basales, tallos laterales y exceso de racimos para equilibrar vigor vegetativo y producción de frutos de calidad.

Desbrote (o Deshojado)

Retiro manual de chupones (brotes axilares) y hojas viejas para mejorar ventilación, penetración de luz y reducir enfermedades fúngicas.

Riego

Aplicación controlada de agua mediante sistemas por goteo diariamente para evitar estrés hídrico.

Fertilización

Suministro de nutrientes vía fertirriego ya que se utilizaron diferentes concentraciones con fórmulas balanceadas (N-P-K, Ca, B), ajustadas por etapas para maximizar absorción y evitar desbalances.

Para suplementar las deficiencias que sufrían las plantas se utilizaron concentrado de productos como lo fueron:

Bio-Calcio

Elaborado con productos de origen orgánico. Es un nutriente en el que su principal elemento es el calcio, es un insumo Orgánico para cultivo de plantas que impacta favorablemente al suelo.

Enerfer-Bio

Fertilizante líquido que contiene principalmente fósforo, complementado con nitrógeno y potasio, diseñado para estimular el crecimiento de raíces, la fotosíntesis y la división celular, contribuyendo al crecimiento general del cultivo y a la calidad de sus frutos.

IonGro-Complex

Tiene como finalidad primordial, cubrir las necesidades de elementos menores en los diversos cultivos (frutales, hortícolas, cereales, granos, ornamentales). Es un fertilizante foliar líquido humectable y de alta concentración. Está compuesto de varios agentes quelatantes perfectamente balanceados para una completa asimilación por frutos, hojas y raíces.

Control de Plagas y Enfermedades

Monitoreo y aplicación de tratamientos químicos contra mosquita blanca, pulgones, priorizando el MIP (manejo integrado de plagas).

Raleo

Se realizó la eliminación frutos, asegurándose de haber tenido de 4 a 5 frutos por racimo.

Cosecha

Recolección manual de frutos maduros en etapas comerciales (rojo o rosa), 1 corte por cada semana, con cuidado para no dañar la planta y maximizar rendimiento.

Control fitosanitario:

Tabla 4. Productos fitosanitarios aplicados para control de plagas y enfermedades

Función	Ingrediente Activo	Nombre comercial	Dosis
Insecticida/acaricida	Dimetoato	Deltapyr 40 C.E	2.5 ml/L
Insecticida	Imidacloprid	Confidel 350 SC	2 ml/L

3.6 Descripción de los tratamientos

Los tratamientos evaluados se describen en 7 tratamientos, en los cuales consistieron en dos concentraciones de Solución Nutritiva (SN) diferentes. Los primeros cuatro tratamientos tuvieron un riego con una concentración de SN al 100 %, los tres últimos tratamientos estuvieron a una concentración de SN al 70 %.

Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

Concentración de SN al 100%

Tratamiento 1 (T1): Testigo

Tratamiento 2 (T2): Rizobacterias

Tratamiento 3 (T3): Nanotubos de carbono (NTC)

Tratamiento 4 (T4): NTC + rizobacterias

Concentración de SN al 70%

Tratamiento 5 (T5): Rizobacterias

Tratamiento 6 (T6): Nanotubos de carbono (NTC)

Tratamiento 7 (T7): NTC + rizobacterias

Tabla 5. Descripción de tratamientos aplicados.

SN 100%	Aplicaciones DT
T1 Testigo	
T2 Rizobacterias	1ra - 30 días
T3 NTC	
T4 Rizobacterias + NTC	
SN 70%	2da - 56
T5 Rizobacterias	
T6 NTC	3ra - 85 días
T7 Rizobacterias + NTC	

3.7 Variables agronómicas evaluadas

3.7.1 Variables agronómicas

Rendimiento (g/planta)

En el cultivo de tomate bajo invernadero, el rendimiento se mide como el peso total de frutos cosechados por planta en gramos. Esta variable integra el número de frutos y su calibre.

No. Frutos por planta

Se realizó el conteo total de frutos maduros por planta en tomate, correlacionando directamente con el rendimiento y alcanzando hasta densidades altas.

En sistemas hidropónicos, el control de riego y temperatura eleva significativamente el cuajado floral y número de frutos.

Altura de planta

El largo o altura de la planta en tomate invernado mide el vigor vegetativo desde la base al ápice, influido por entutorado y condiciones controladas que promueven crecimiento indefinido. Plantas vigorosas con entrenudos cortos maximizan la captura

de luz y producción, con alturas que soportan múltiples cosechas anuales. Se asocia con mayor biomasa y rendimiento en densidades comerciales.

Diámetro de tallo

Mide el grosor del tallo principal en la base (en mm), indicando robustez para soportar frutos pesados en tomate de invernadero vigoroso. Correlaciona con flujo de asimilados y resistencia a ahilado, esencial en ciclos largos bajo alta densidad. En condiciones protegidas, tallos más gruesos mejoran la estabilidad y rendimiento total.

Biomasa fresca de la planta

Evalúa el peso fresco total de la parte aérea postcosecha en tomate invernado, reflejando acumulación de materia orgánica bajo óptimas temperaturas y fertiirrigación.

Biomasa seca de la planta

Peso remanente tras secado, mide partición de asimilados en tomate, correlacionando con rendimiento sostenible en sustratos hidropónicos. Alta biomasa seca soporta producción de 20.6 kg/planta de frutos en sistemas controlados. Refleja eficiencia nutricional en alta tecnología.

Largo de raíz

Esta variable se obtuvo al sacar las raíces de las plantas de la maceta en la que se encontraba, posteriormente se realizó un lavado de raíces en cada uno de los tratamientos, finalmente se hace la medición de la raíz. Longitud máxima del sistema radical en tomate invernado, crucial para absorción en sustratos o hidroponía, mejorando tolerancia a estrés hídrico.

Peso fresco de raíz

Masa fresca de raíces extraídas, indica vigor subterráneo en tomate de invernadero para soporte foliar y nutrientes en sustratos limitados. Esencial en sistemas hidropónicos donde raíces elevan rendimiento. Pesa tras lavado suave.

Peso seco de raíz

Peso seco de raíces, refleja adaptación y partición biomasa en tomate invernado, clave para supervivencia en ciclos prolongados. Alta materia seca radical mejora rendimiento bajo fertiirrigación integrada. Indicador de eficiencia en alta tecnología.

3.7.2 Variables de calidad

Las variables de calidad listadas corresponden a indicadores estándar en la evaluación postcosecha de frutos como el tomate (*Solanum lycopersicum* L.), enfocados en contenido nutricional, dulzor y textura física.

Vitamina C (mg/100 gr)

El contenido de vitamina C se obtuvo mediante el método de Tillmans (o Tillman-Thielmann), donde se utilizaron 20 g de fruta fresca por cada tratamiento y en cada repetición.

Solidos solubles totales (SST) (° Brix)

Los SST se miden directamente con refractómetro, indicando el contenido de azúcares. Esta variable afecta el sabor percibido y la calidad comercial.

Firmeza (Kg/cm²)

La firmeza se evalúa con penetrómetro, midiendo la fuerza de punción en kg/cm².

3.8 Análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental con bloques completamente al azar con siete tratamientos, doce repeticiones y cuatro bloques, en cada bloque se llevaron 21 plantas, con un total de 84 plantas en este diseño. El programa estadístico utilizado para realizar el análisis de varianza (ANVA) fue SAS 9.1 y se realizó la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Rendimiento (g/planta)

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos observar que para la variable rendimiento por planta (**Fig. 2**), el tratamiento con mejores resultados fue el T5, quien superó en 14.3% más al tratamiento testigo, esto puede ser debido al efecto de las rizobacterias sobre la absorción de nutrientes que se traduce en mayor rendimiento.

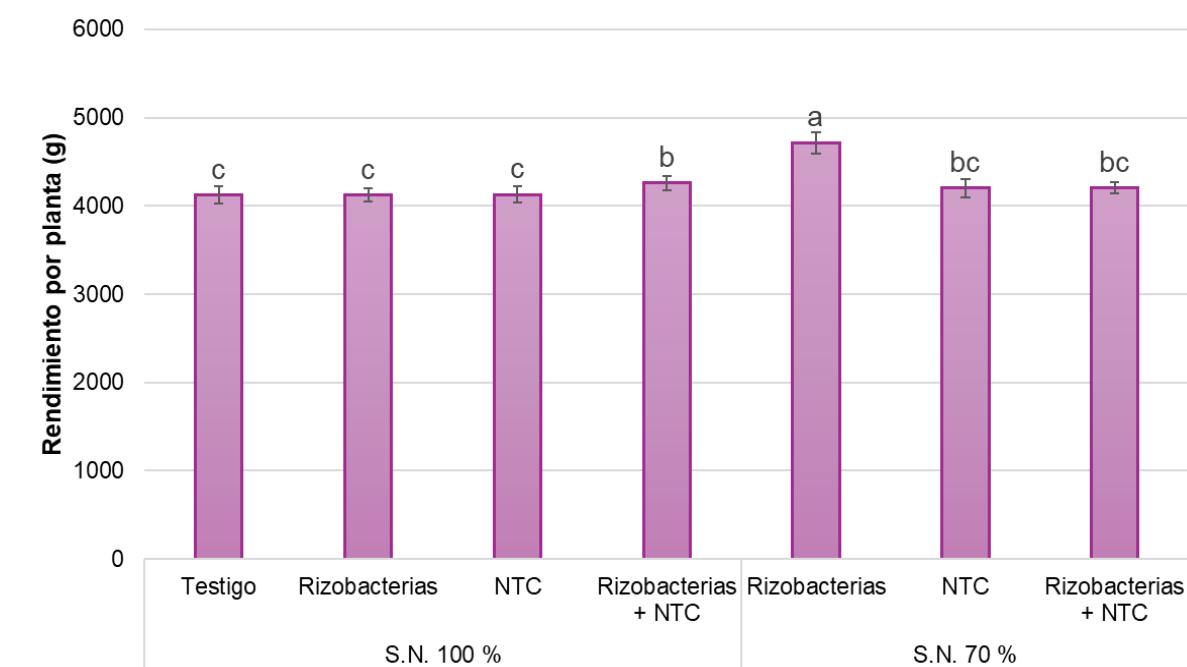


Figura 2. Rendimiento por planta (g), obtenido en tomate con los diferentes tratamientos evaluados. Valores por encima del gráfico, representan el rendimiento total de 12 de plantas.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por González-García et al., (2021), quienes en un estudio en tomate reportó incrementos del 15% bajo estrés por *Alternaria solani* y 21% sin patógeno con nanotubos de carbono, debido a mayor fotosíntesis y eficiencia hídrica. Otro trabajo halló 20% más rendimiento con *Bacillus cereus* y estiércol solarizado, por solubilización de fosfatos y sideróforos (Ruiz-Romero et al., 2022).

4.2 Número de frutos por planta

De acuerdo con el análisis de varianza y la comparación de medias realizada para la variable número de frutos por planta bajo condiciones de invernadero, los resultados indican que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos

evaluados (**Fig. 3**). Estos tratamientos incluyeron un testigo sin aplicación, la inoculación con rizobacterias, la aplicación de nanotubos de carbono, y la combinación de rizobacterias con nanotubos de carbono, administrados en dos concentraciones diferentes de solución nutritiva, al 100% y al 70%.

Es posible que la variable número de frutos por planta sea menos sensible a las modificaciones introducidas por los tratamientos en comparación con otras variables de crecimiento o rendimiento, especialmente en un ambiente controlado como el invernadero, donde otros factores agronómicos puedan ejercer una mayor influencia. Otra razón podría ser que las dosis aplicadas de nanotubos de carbono y rizobacterias, así como las combinaciones con diferentes concentraciones de solución nutritiva, no fueron óptimas para estimular un aumento en el número de frutos.

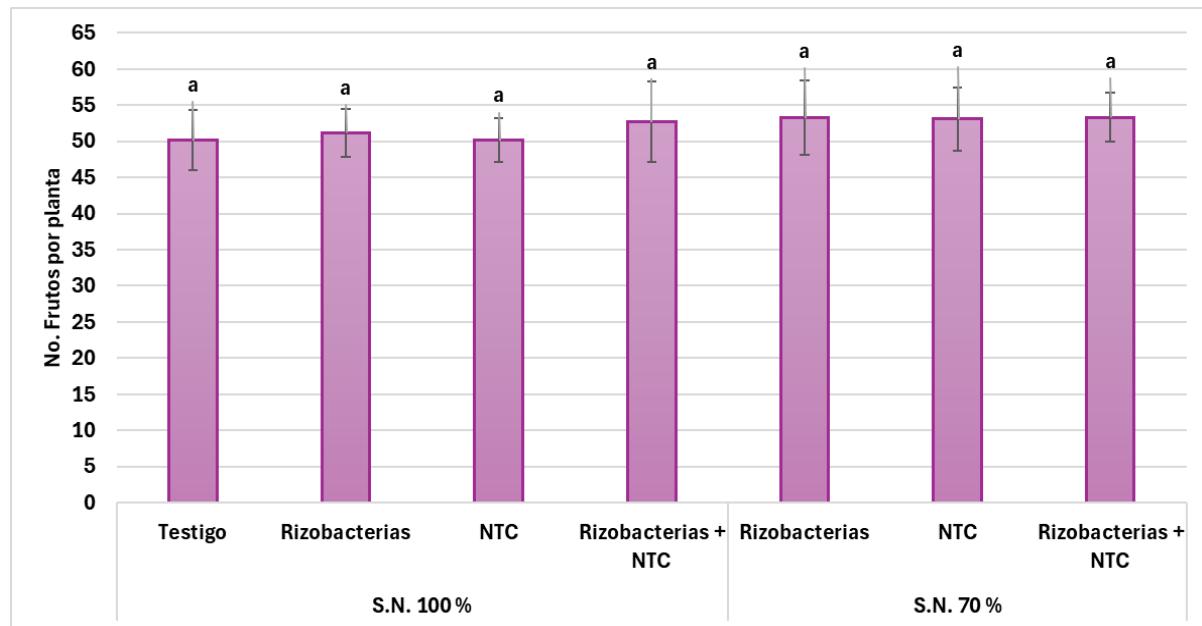


Figura 3. Variable de numero de frutos por planta aplicando diferentes tratamientos.

Varios estudios recientes con rizobacterias en tomate bajo invernadero reportan ausencia de diferencias significativas comparadas con el control, a pesar de efectos posteriores en biomasa o longitud de tallo. Reportes como el de El Hjouji et al., (2025) en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*), y metaanálisis recientes de biofertilizantes con *Bacillus* spp., indican que no siempre hay impacto significativo en variables reproductivas como número de frutos por planta, especialmente bajo condiciones óptimas de invernadero donde la nutrición basal enmascara efectos.

El Hjouji et al. (2025) observaron que cuatro aislados de *Bacillus* spp. no generaron diferencias significativas en respuestas de plántulas tempranas de tomate (*Solanum lycopersicum*) en invernadero, aunque mejoraron germinación in vitro y crecimiento.

Esto sugiere que la colonización radicular y factores ambientales retrasan impactos en producción de frutos.

4.3 Altura de planta

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias para la variable altura de planta (**Fig. 4**), los resultados indican que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. Esto implica que, bajo las condiciones experimentales analizadas, ninguno de los tratamientos tuvo un efecto destacado en el crecimiento vertical de las plantas a nivel estadístico.

Algunas razones podrían explicar esta ausencia de varianza significativa:

- Condiciones de cultivo controladas: El ambiente del invernadero puede haber proporcionado condiciones óptimas y uniformes de temperatura, humedad y luz que favorecieron un desarrollo similar en todas las plantas, minimizando el impacto diferencial de los tratamientos.
- Efectos específicos de los tratamientos: Es posible que los tratamientos influyan más en otros aspectos del desarrollo, como la resistencia a estrés, calidad del fruto o incremento de biomasa radicular, en lugar de alterar la altura de planta directamente.

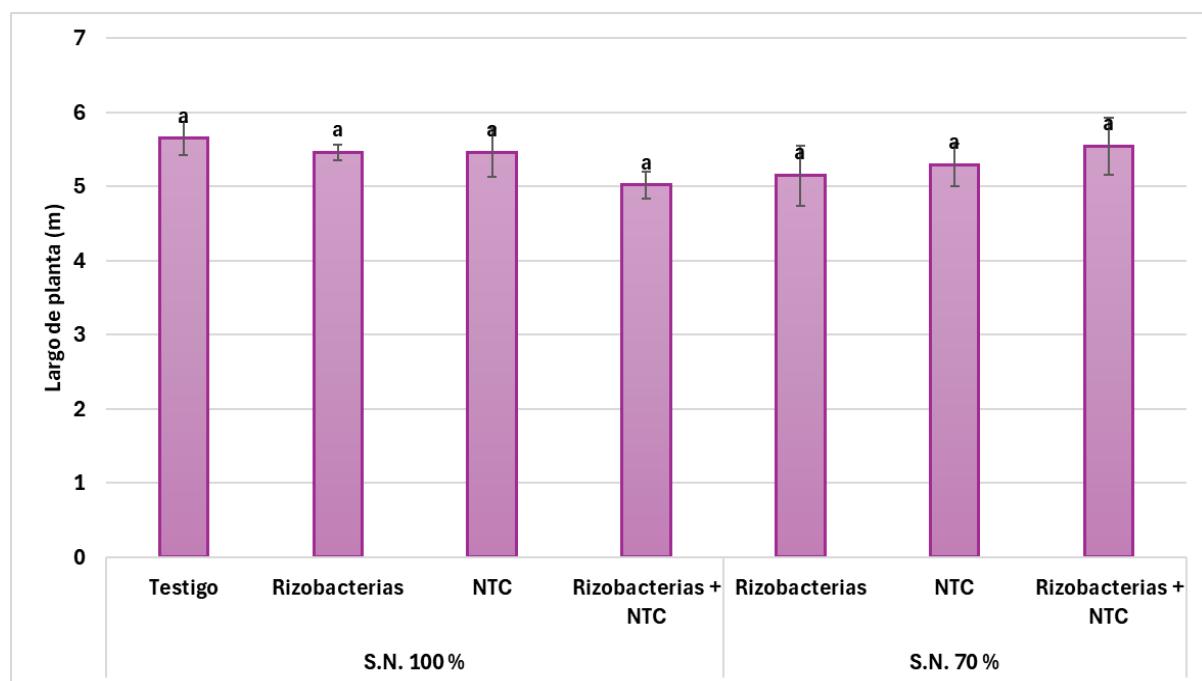


Figura 4. Desarrollo de la altura de planta de tomate var. Mago, aplicando los diferentes tratamientos.

Un estudio realizado por El Hjouji et al. (2025), sobre rizobacterias aisladas de la rizosfera del tomate, se evaluaron cuatro cepas (*Bacillus cereus* RS60, *Bacillus pumilus* RS46, *Bacillus amyloliquefaciens* RP6 y *Bacillus velezensis* RS65) bajo condiciones de invernadero. Aunque estas cepas promovieron significativamente el crecimiento posterior (longitud de brote, número de hojas y peso seco), no se observaron diferencias significativas en la germinación de semillas ni en la longitud de plántulas.

Por su parte en el análisis comparativo realizado por Liné et al., (2021) entre cuatro especies cultivadas (*Solanum lycopersicum*, *Brassica napus*, *Cucumis sativus* y *Zea mays*) expuestas por nanotubos de carbono (NTC, 100 mg·kg⁻¹ en el suelo) reveló respuestas variables por especie vegetal. En tomate (*Solanum lycopersicum*), no se detectaron cambios en el crecimiento. Además, informa efectos positivos en aumento >50 % en biomasa y área foliar y +29 % clorofila en pepino, efectos negativos -14 % en altura de maíz y ausencia de efecto en tomate, comparando las magnitudes entre especies.

4.4 Diámetro de tallo

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza para la variable diámetro del tallo en tomate, se observaron diferencias estadísticas relevantes entre los tratamientos evaluados. En particular, el tratamiento testigo presentó valores superiores en comparación con los tratamientos que incluyeron rizobacterias en combinación con diferentes concentraciones de solución nutritiva.

Específicamente, cuando se aplicaron rizobacterias con una solución nutritiva al 70%, el diámetro del tallo mostró una disminución del 18.44% con respecto al testigo. Del mismo modo, bajo una solución nutritiva al 100%, se registró una reducción del 12.55% en comparación con el tratamiento control. Estos resultados indican que la incorporación de rizobacterias (solos o en combinación con nanotubos de carbono) no generó un aumento en el diámetro del tallo en las condiciones experimentales, e incluso produjo una respuesta menos favorable que la del testigo (**Fig. 5**).

Esta respuesta de las rizobacterias puede deberse a la adaptación insuficiente de las rizobacterias al sustrato, si las rizobacterias no se establecen adecuadamente en el rizosistema, su efecto benéfico disminuye y puede incluso volverse neutral o negativo.

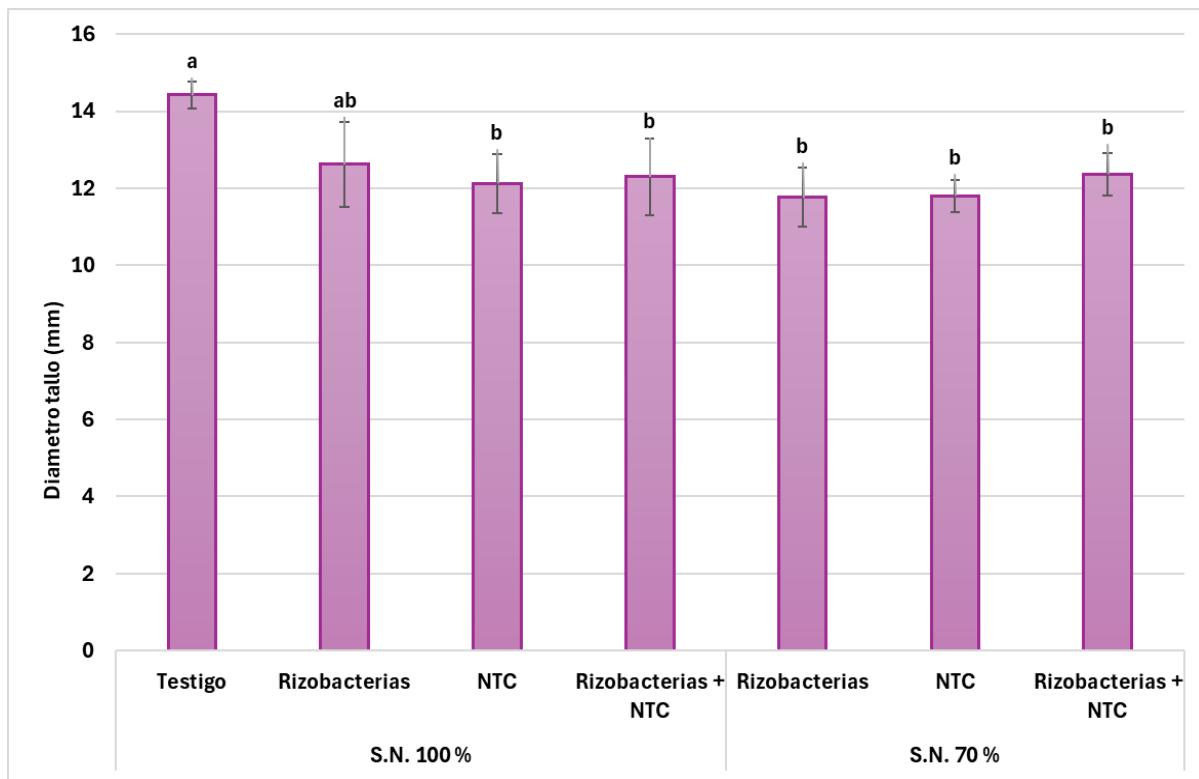


Figura 5. Diámetro de tallo bajo los tratamientos de las rizobacterias con una concentración de SN al 100% y al 70%, reflejando una disminución de diámetro con respecto al testigo.

Meutia, et al., (2023) evaluaron 5 aislados rizobacterianos inoculados en tomate bajo condiciones de vivero, midiendo crecimiento vegetativo (altura, diámetro de tallo). En sus resultados, la inoculación con rizobacterias no tuvo un efecto significativo sobre el diámetro de tallo comparado con el control.

Este estudio sugiere que, aunque las rizobacterias pueden tener otras funciones (nutrición, solubilización de fosfatos, producción de fitohormonas), dichas funciones no siempre se traducen en un engrosamiento del tallo, especialmente en etapas tempranas. Es decir, la eficacia de PGPR puede depender del desarrollo de la planta, su edad, y las condiciones del sustrato/ambiente.

4.5 Biomasa fresca de la planta

Con respecto a los resultados obtenidos en la variable de biomasa fresca de la planta, se tiene una diferencia significativa entre los tratamientos aplicados. Siendo el T1 (testigo con SN 100%), el T3 (NTC con SN al 100%) y el T4 (rizobacterias + NTC con SN al 100%) quienes no presentan diferencias, sin embargo con respecto al T6 (NTC con SN 70%) representa una varianza significativa (**Fig. 6**).

Esto podría deberse a que la planta por estar bajo un estrés de deficiencia de nutrición y en combinación con los NTC, no haya sido favorable para la planta, indicando que una nutrición inadecuada no sea apta para la buena respuesta de los NTC.

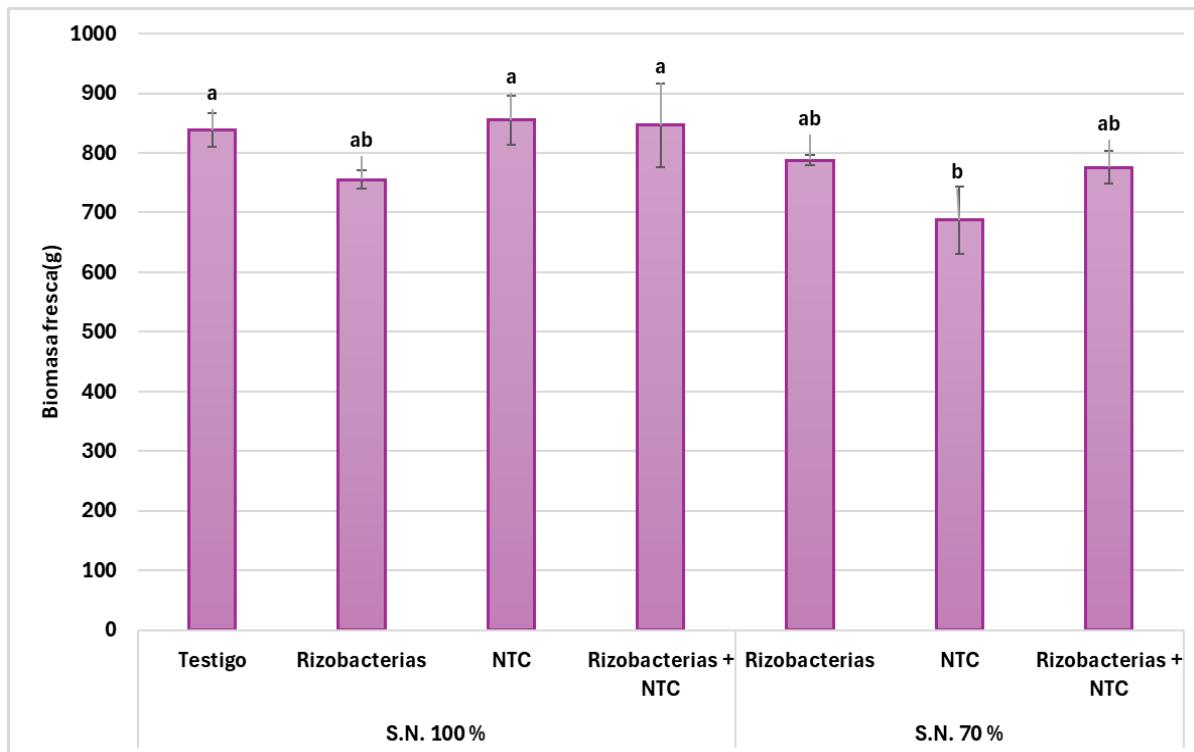


Figura 6. Biomasa fresca de planta de tomate obtenida con los diferentes tratamientos aplicados.

Varios estudios recientes han observado que la aplicación MWCNT en cultivo de tomate puede incrementar la biomasa o producción cuando las condiciones lo permiten. Por ejemplo, González-García et al., (2021) reporta en un experimento con *Solanum lycopersicum* se encontró que la aplicación foliar de MWCNT redujo la incidencia de *Alternaria solani* y aumentó la biomasa de la planta y el rendimiento de fruto, lo que sugiere una mejora en crecimiento y productividad.

Por otro lado, en otra investigación realizado por Gashash et al., (2022), reporta que la inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR), como cepas de *Bacillus subtilis* y *Bacillus amyloliquefaciens*, ha mostrado incrementos significativos en parámetros de crecimiento, producción y calidad de fruto en tomate.

4.6 Biomasa seca de la planta

En los resultados obtenidos (**Fig. 6**), tenemos que con respecto al testigo (T1), la producción de biomasa seca tuvo un mejor resultado en comparación con los nanotubos de carbono con SN al 100% (T3), con una varianza significativa y con un resultado del 39.8 % menos de producción en comparación al testigo.

En comparación al T6 (nanotubos de carbono con SN al 70%), quien tuvo mejores resultados al T3, teniendo un 19.04% más en producción.

De igual forma, el T4 (rizobacterias + nanotubos de carbono con SN al 100%) tuvo una varianza significativa con respecto al T7, superando con un 16% mas de producción de biomasa seca al T4 (**Fig. 7**).

En tales casos, una reducción en nutrientes, las rizobacterias y los nanotubos de carbono llegan a tener una mejor respuesta.

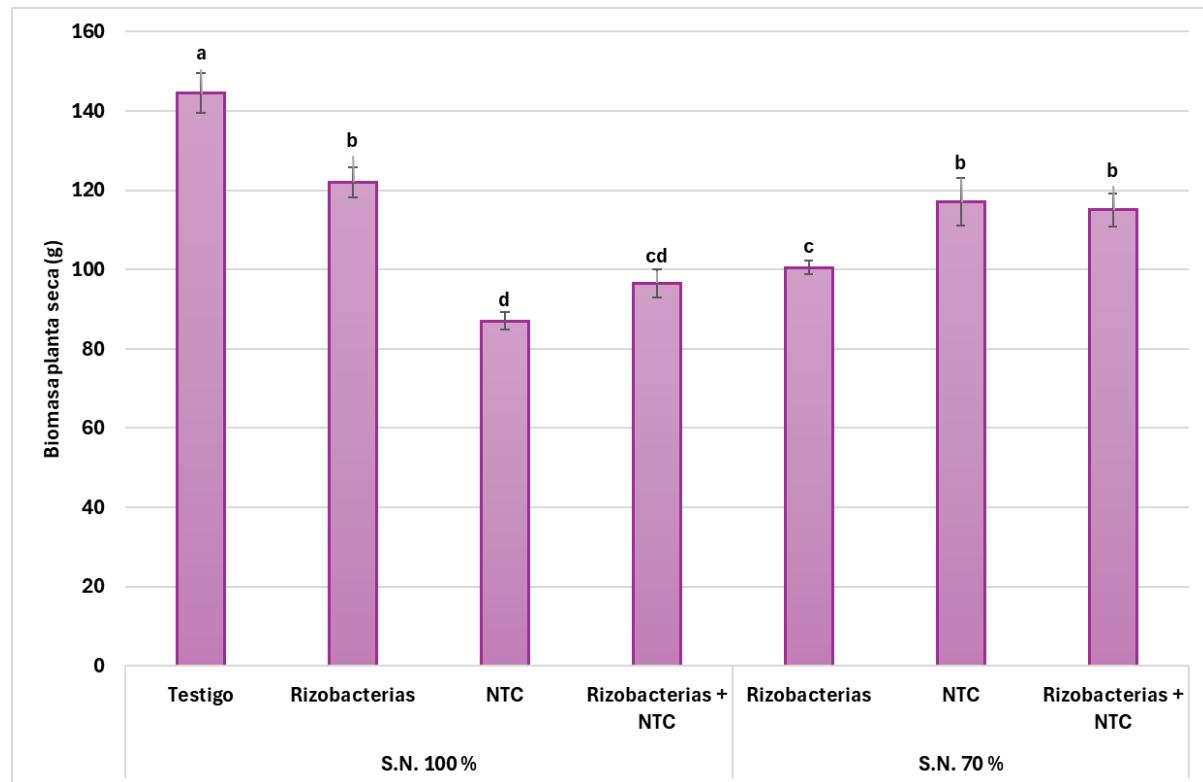


Figura 7. Obtención de biomasa seca en la planta de tomate a diferentes concentraciones de solución nutritiva.

Estudios llevados a cabo por Wang et al., (2024), reporta que los NTC (aplicados por nano-priming de semilla, riego o foliarmente) mejoran parámetros fisiológicos relevantes (germinación, clorofila, actividad de enzimas antioxidantes y contenido de compuestos bioactivos) en tomate y especies afines, especialmente cuando la planta está sometida a estrés (salino, hídrico o restricciones nutricionales). El mecanismo

propuesto es múltiple: los NTC pueden aumentar la permeabilidad y la absorción de agua/nutrientes, modular hormonas y activar sistemas antioxidantes que ayudan a la planta a tolerar condiciones subóptimas; además, sus efectos son dependientes de la concentración (efecto en campana: dosis bajas óptimas; benefician, dosis altas pueden ser tóxicas).

Estudios experimentales con inoculación de rizobacterias en tomate realizados por Hernández-Amador et al., (2024), muestran que, cuando la disponibilidad de nutrientes se reduce a un 50% de la solución nutritiva recomendada, la presencia de comunidades microbianas seleccionadas o inoculadas aumenta biomasa y otros rasgos fenotípicos en comparación con controles con la misma baja fertilización sin inoculación. Esto se observa porque bajo baja fertilización las plantas tienden a reclutar y favorecer a bacterias que facilitan la disponibilidad de N y P (fijación biológica, solubilización de fosfatos), producen auxinas que aumentan el crecimiento radicular y sideróforos que movilizan micronutrientes.

4.7 Largo de raíz

Los resultados sobre el largo de las raíces mostraron diferencias notables según los tratamientos aplicados. La combinación de rizobacterias y NTC (T4) en una solución nutritiva al 100% fue la más efectiva, logrando un 11.36% más en comparación con el testigo. Esto sugiere que ambas tecnologías trabajan bien juntas, las rizobacterias ayudan a que las raíces crezcan y se alarguen al producir auxinas, solubilizar nutrientes y mejorar la microbiota en la rizosfera. Por otro lado, los NTC, al aplicarse por vía foliar, pueden mejorar la absorción de agua y activar procesos fisiológicos en las plantas, contribuyendo así a un mejor desarrollo radicular.

En cambio, el tratamiento que solo utilizó NTC (T3) con la misma solución nutritiva al 100% mostró resultados negativos, con un 17% menos de crecimiento en las raíces en comparación con el testigo (**Fig. 8**). Esto sugiere que, sin las rizobacterias, los NTC no lograron tener un efecto positivo e incluso podrían haber perjudicado a las raíces. Una posible explicación es que, en concentraciones inadecuadas, los nanotubos pueden causar estrés oxidativo y alterar el equilibrio hormonal de la planta. Sin el apoyo de las rizobacterias las plantas no pudieron beneficiarse de sus propiedades protectoras y nutritivas (Safdar et al., 2022; Hao et al., 2023).

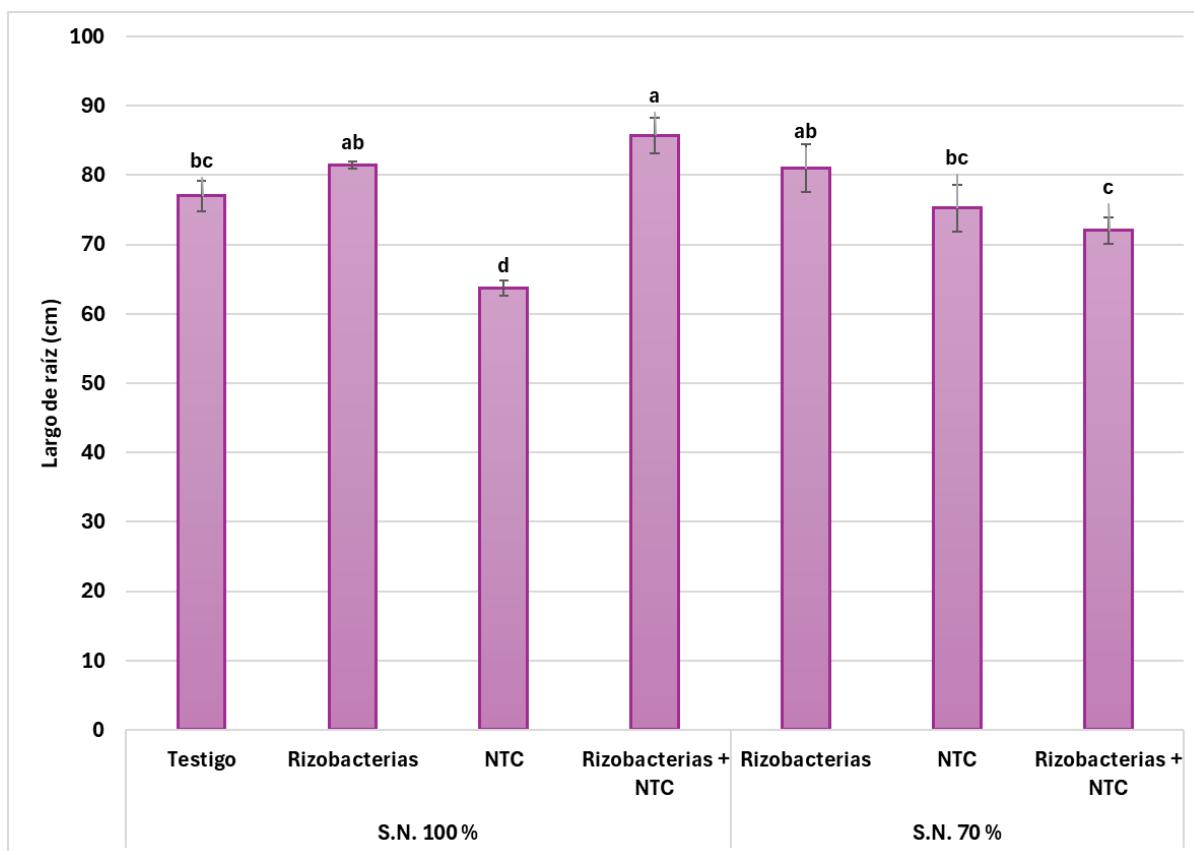


Figura 8. Efecto de las rizobacterias y los nanotubos de carbono en el largo de raíz del tomate bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva.

En estudios con rizobacterias (PGPR) en berenjena realizados por Lobato-Ureche et al. (2023) y colegas también encontraron que cultivos inoculados con consorcios de PGPR presentaron raíces más largas y mayor biomasa radical en comparación con controles, especialmente cuando la disponibilidad de nutrientes era restringida (los PGPR mitigaron parte del estrés nutricional). Estos autores subrayan mecanismos como solubilización de P, fijación biológica de N y producción de IAA.

Sigala-Aguilar et al. (2024/2025) en ensayos con MWCNTs aplicados al suelo en tomate observaron cambios en metabolismo y, en varios tratamientos, reducción del crecimiento radical o efectos negativos en algunos parámetros de crecimiento (dependiendo de dosis y forma de aplicación). Estas observaciones concuerdan con que los CNT pueden ser fitotóxicos para tomate a ciertas dosis o presentaciones.

Hao et al. (2023) resumen resultados de experimentos donde SWCNT o MWCNT inhibieron el crecimiento radicular de tomate en tratamientos específicos (mientras que otras especies mostraron promoción o efecto neutro), sugiriendo sensibilidad de *Solanum lycopersicum* frente a algunos nanomateriales de carbono.

4.8 Peso fresco de raíz

En la variable de peso fresco de la raíz, se obtuvieron diferencias significativas con respecto a los diferentes tratamientos aplicados, siendo el tratamiento 2 (rizobacterias con concentración de solución nutritiva al 100%) obteniendo buenas respuestas a aplicación de rizobacterias, superando al testigo con un 16.21% más. En cambio, a una concentración de SN al 70%, no tuvo diferencias significativas.

Una comparación con el T4 y el T7, tuvieron una diferencia significativa de acuerdo con el análisis, siendo el T4 como el segundo tratamiento con mejor respuesta con respecto al testigo, superando por un 7.24%, a diferencia del T7, que tuvo diferencia significativa, con un 15.86% menos que el testigo (**Fig. 9**).

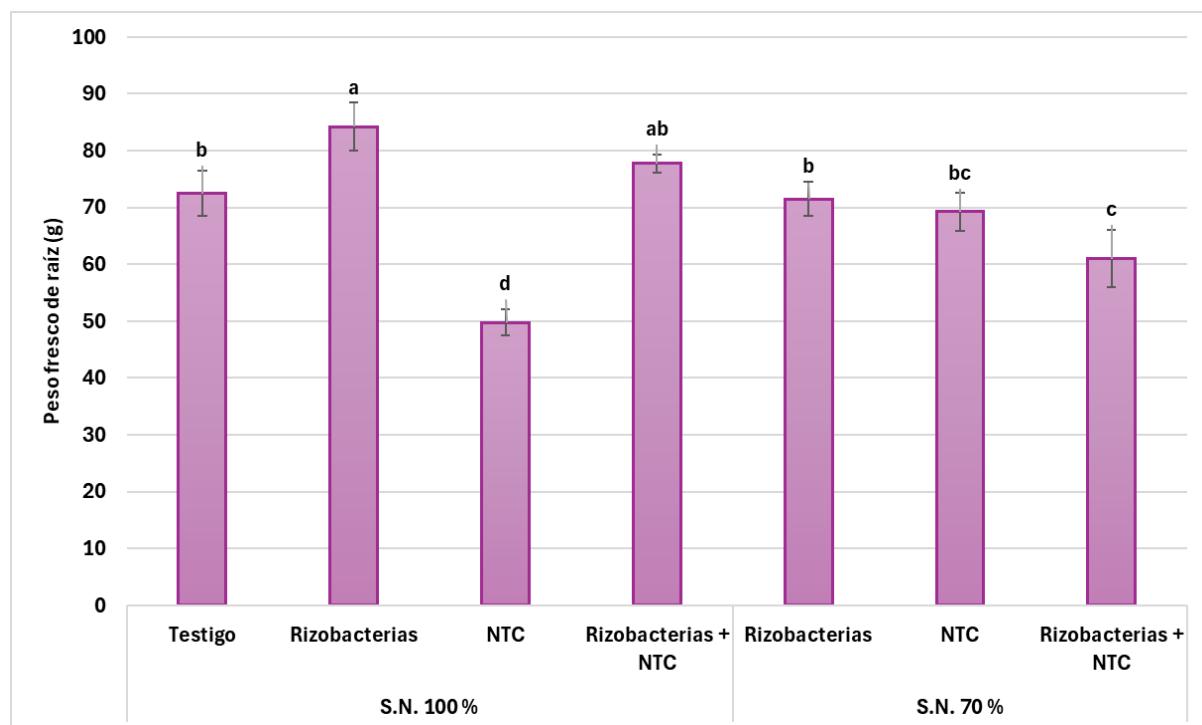


Figura 9. Respuesta de la planta a los diferentes tratamientos aplicados para la variable de peso fresco de la raíz en tomate.

Investigaciones realizadas por Palacio-Rodríguez et al. (2022) reportaron incrementos significativos en peso fresco de raíz en tomate luego de la inoculación con distintas cepas de PGPR bajo condiciones de invernadero; en su trabajo algunas cepas (LBEndo1 y KBECTo4) produjeron diferencias estadísticamente significativas respecto al testigo.

Hernández-Amador et al. (2024) realizaron ensayos con diferentes cepas de PGPR en tomate y documentaron aumentos sustanciales en biomasa fresca de raíz (porcentajes altos en algunos tratamientos, p. ej. incrementos en peso fresco de raíz

hasta >60% en ciertos aislamientos) estos trabajos enfatizan la importancia de la cepa y del sustrato/condición nutricional para que el efecto se manifieste. Por tanto, que en el T2 (rizobacterias + SN 100%) se observe un incremento de +16.21% respecto al testigo. Totalmente coherente con la literatura cuando la cepa o consorcio tiene buena actividad promotora.

Del mismo modo, Camacho-Rodríguez et al. (2022) demostraron que algunas cepas no modificaron significativamente el peso fresco de raíz en jalapeño en determinados sustratos.

Con respecto a NTC y su interacción con raíces en tomate, los reportes hechos por Hao et al. (2023) son mixtos y altamente dependientes por la dosis y forma de aplicación, mostraron que ciertos nanomateriales (incluyendo CNT) inhibieron el crecimiento radicular de tomate en concentraciones específicas, mientras que otras especies presentaron crecimiento estimulado o sin efecto.

4.9 Peso seco de raíz

El tratamiento con mejores resultados con respecto a la variable del peso seco de la raíz fue el T2 (rizobacterias con SN al 100%) obteniendo una diferencia significativa de un 29% más con respecto al testigo. Este resultado pudiera deberse a la producción de fitohormonas como auxinas por rizobacterias PGPR (*Bacillus spp.*), que modifican la arquitectura radicular y promueven mayor biomasa radicular al mejorar la colonización rizosférica y solubilización de nutrientes en condiciones óptimas de nutrición. Esta concentración plena de solución nutritiva favorece la actividad metabólica radicular y la fijación de N, potenciando el vigor de raíces en tomate.

A diferencias del T7 quien claramente se vio una diferencia significativa donde se obtuvo un 29% menos peso. La reducción del 29% T7, pudiera deberse a interacciones negativas entre los NTC y las rizobacterias provocando la limitación en el crecimiento y la biomasa de la raíz, incluso en presencia de PGPR. Además, la solución al 70% empeora la situación al causar un desbalance hídrico y una menor absorción de macronutrientes (**Fig. 10**).

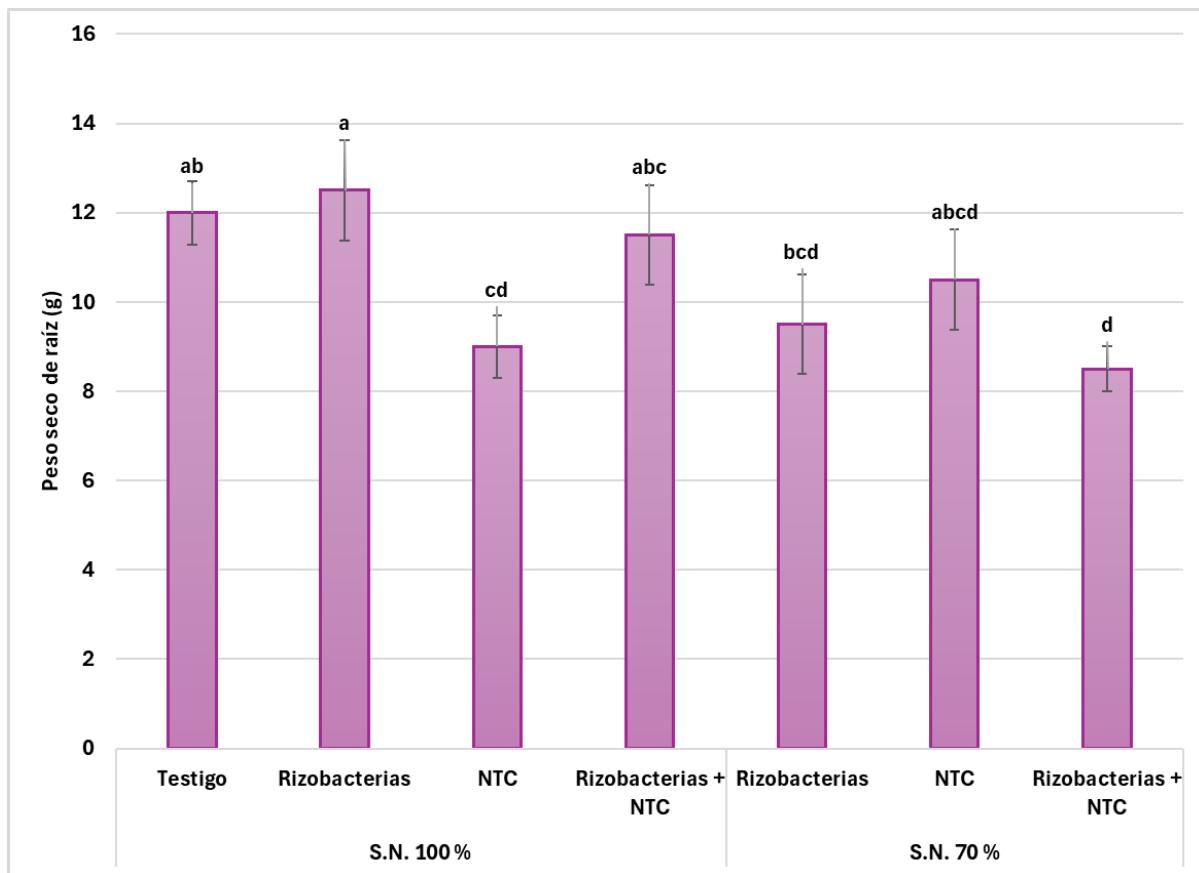


Figura 10. Resultados obtenidos de peso seco de raíz con diferentes tratamientos en tomate.

Habtamu et al. (2022) evaluaron rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) como *Bacillus* BDUA1 en tomate bajo invernadero, reportando incrementos significativos en peso seco de raíces de hasta 0.59 g en variedades Maya y Melkesalsa, atribuibles a producción de auxinas y solubilización de fosfatos que mejoran la arquitectura radicular.

El estudio realizado por Luna Martínez et al. (2013) caracterizaron rizobacterias de rizosfera de tomate (MA06, MA12), incrementando peso seco de vástago en 17-20% pero sin efecto significativo en raíces, destacando dependencia de condiciones nutricionales plenas para maximizar biomasa.

Estudios sobre combinaciones/coexposición muestran resultados de Long et al. (2024) documentan que MWCNTs modulan efectos de otros contaminantes y cofactores, a veces reduciendo fitotoxicidad (ej. al adsorber herbicidas) y en otras condiciones potenciando estrés químico y reduciendo biomasa.

4.10 Vitamina C (mg/100 gr)

Los resultados obtenidos para el contenido de vitamina C en los frutos de tomate muestran que existió una varianza significativa entre los diferentes tratamientos evaluados, lo cual evidencia que la interacción entre la nutrición mineral, la aplicación de nanotubos de carbono y la presencia de rizobacterias puede modificar la síntesis y acumulación de este compuesto antioxidante.

En el T7 no hubo variación marcada respecto al testigo. La diferencia fue apenas un 6% por debajo del valor del testigo, indicando que, a este nivel de nutrición, la interacción no afecta negativamente la biosíntesis de vitamina C en los frutos. Este comportamiento sugiere que la planta mantiene su capacidad antioxidante aún bajo una nutrición ligeramente reducida, probablemente debido a procesos de compensación fisiológica o a una tolerancia al estrés inducido por la presencia combinada de nanotubos y rizobacterias (**Fig. 11**).

Por el contrario, el T3 mostró una disminución significativa de 31% menos en comparación al testigo, indicando que, bajo condiciones nutricionales óptimas, los NTC por sí solos generan un impacto negativo sobre la síntesis de esta vitamina. Este descenso podría asociarse a una alteración en el metabolismo oxidativo o a un incremento del estrés fisiológico, lo que reduce la capacidad de la planta para mantener niveles adecuados de compuestos antioxidantes como el ácido ascórbico.

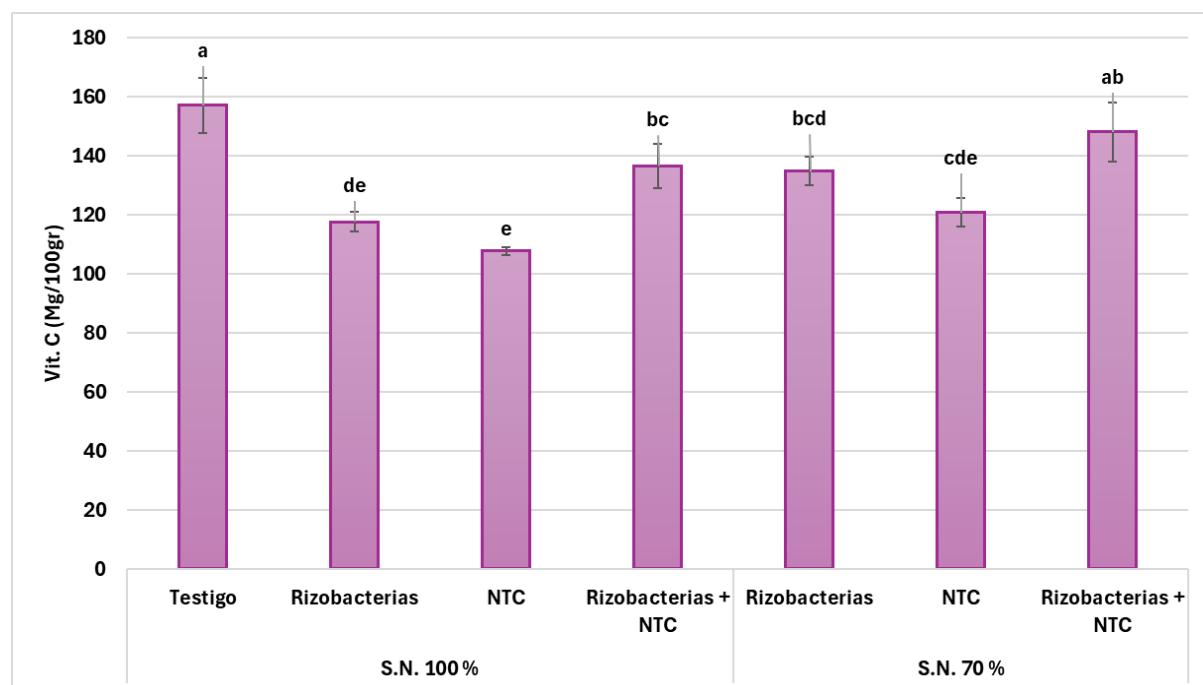


Figura 11. Contenido de vitamina C con diferentes tratamientos y concentraciones de solución nutritiva aplicados en tomate.

González-García et al., (2022) reportaron que la aplicación de NTC en tomate puede aumentar los metabolitos secundarios, incluyendo la vitamina C, especialmente cuando los NTC se aplican en contextos de estrés (infección por *Alternaria solani*). Los autores atribuyen el incremento a una respuesta de defensa/antioxidante inducida que eleva acumulación de compuestos, en algunos tratamientos se observó el aumento de vitamina C, en otros (altas concentraciones o aplicaciones no optimizadas) puede haber fitotoxicidad o efectos neutros.

Palacio-Rodríguez et al. (2022) reportaron que PGPR en pimiento bajo estrés redujeron vitamina C mínimamente (4-9%) en combinación, pero NTC independientes causaron pérdidas del 28-32% por disrupción redox.

4.11 SST ($^{\circ}$ Brix)

En el análisis con respecto a la variable de sólidos solubles totales, se obtuvieron resultados similares, representando que no se presentaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos aplicados en el tomate (Fig. 12).

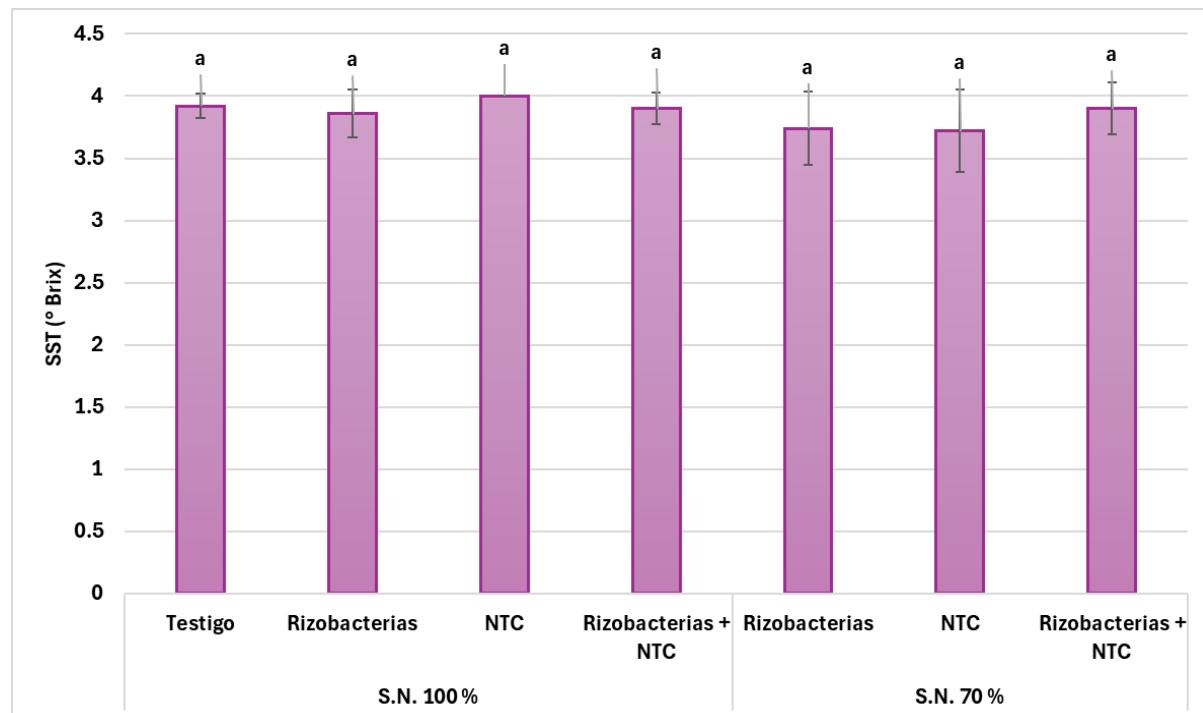


Figura 12. Resultado de los sólidos solubles totales (SST) en tomate bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva aplicados a los tratamientos.

En una investigación llevada por Gashash et al. (2022) evaluaron PGPR en frutos de tomate bajo invernadero, encontrando que la inoculación no generó diferencias significativas en el contenido de sólidos solubles totales (SST) entre tratamientos con PGPR y el control atribuyendo a que la nutrición basal óptima enmascara efectos en

metabolitos secundarios como azúcares. En contraste, Medina-Peralta et al. (2018) reportaron incrementos en SST con *Bacillus* sp. en sustratos orgánicos, pero la interacción sustrato y PGPR solo mostró significancia marginal ($p<0.05$), alineándose parcialmente con su ausencia de diferencias al indicar que factores edáficos dominan sobre bioestimulantes en SST. González Rodríguez (2017) observó que *Aeromonas* spp. no alteró significativamente los °Brix en tomate.

4.12 Firmeza (Kg/cm²)

En relación con la variable de firmeza del fruto, los resultados obtenidos muestran que no existió una diferencia significativa entre la mayoría de los tratamientos aplicados, tanto en condiciones de solución nutritiva al 100% como al 70%. Esto indica que la aplicación individual de rizobacterias o de NTC, así como la reducción de la concentración de nutrientes, no generó cambios sustanciales en la resistencia mecánica del fruto.

No obstante, el T7 destacó de manera notable, al presentar un incremento del 41% en la firmeza del fruto en comparación con el testigo. Este comportamiento sugiere una posible interacción sinérgica entre los NTC y las rizobacterias cuando la planta se encuentra bajo un nivel de nutrientes reducido. Es probable que esta combinación haya mejorado la modulación hormonal, la absorción de agua, o la integridad de la pared celular (**Fig. 13**).

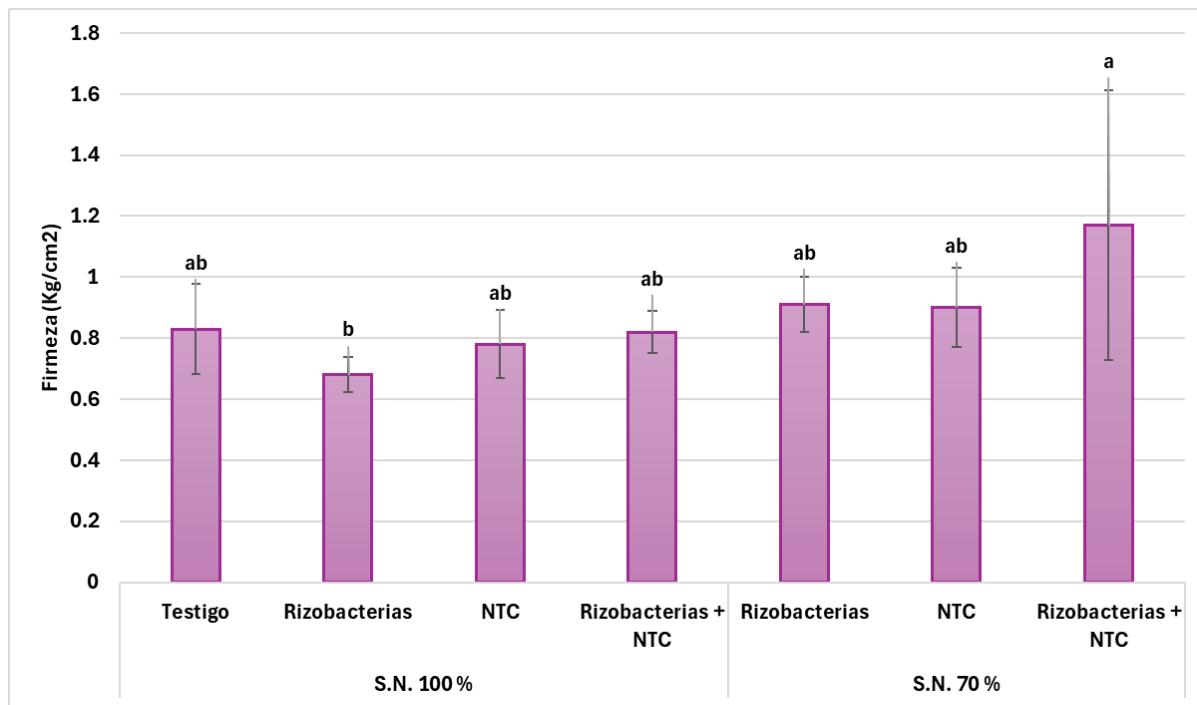


Figura 13. Firmeza obtenida en tomate var. Mago con aplicación de rizobacterias y nanotubos de carbono en concentraciones diferentes de solución nutritiva bajo invernadero.

McGehee et al. (2017) documentaron que la exposición a MWCNT modifica fuertemente el metaboloma de frutos de tomate, lo cual puede relacionarse indirectamente con cambios en texturas y firmeza. En conjunto, sugiere que los NTC pueden aumentar o disminuir la firmeza según dosis, momento de aplicación y presencia de agentes mitigadores.

En pimiento, los estudios llevados a cabo por Bugueño-Guerrero et al. (2024) muestran que inoculaciones con consorcios de PGPR en *Capsicum annuum* con PGPR y bioestimulantes suelen mejoras en calidad de fruto aumentan rendimiento y mejoran atributos de calidad; los autores proponen como mecanismos la mayor absorción de calcio y regulaciones hormonales que favorecen una pared celular más estructurada, lo cual puede explicar incrementos en firmeza.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo obtenido en el experimento mediante la aplicación de rizobacterias y nanotubos de carbono bajo dos concentraciones diferentes de solución nutritiva (SN) 100% y 70%, podemos concluir que el comportamiento de cada una de ellas en las diferentes variables estudiadas tuvo comportamientos con diferencias significativas, destacando que las rizobacterias al reducir la concentración de solución nutritiva a un 70%, responde a un mejor rendimiento superando en 14.3% al tratamiento testigo. Y al incrementar la nutrición, también generan buenos resultados destacando en las variables de la raíz (longitud, peso fresco y peso húmedo).

Mientras que la combinación de nanotubos de carbono con rizobacterias en SN al 100% mostró tendencias positivas en la longitud de raíz y, en biomasa fresca y seca de raíz se mantuvo con resultados igualitarios con respecto al testigo. En comparación, al reducir la nutrición, tienen un mejor comportamiento al presentar un incremento del 41% en la firmeza del fruto en comparación con el testigo.

Estos resultados obtenidos permiten rectificar que la hipótesis planteada solo se cumple de manera parcial. Si bien se esperaba que la aplicación conjunta de rizobacterias y nanotubos de carbono potenciara el rendimiento bajo ambas concentraciones de solución nutritiva, las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas en la mayoría de las variables. No obstante, algunos tratamientos con NTC + rizobacterias mostraron tendencias positivas bajo nutrición completa, lo cual indica que existe una posible sinergia bioestimulante que requiere mayor exploración. En condiciones de nutrición reducida, los tratamientos con rizobacterias lograron compensar parcialmente la disminución nutrimental, evidenciando su papel como agentes mitigadores del estrés.

6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Adisa, I. O., Pullagurala, V. L. R., Peralta-Videa, J. R., Dimkpa, C. O., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., et al. (2019). Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides: A critical review of mechanisms of action. *Environ. Sci.: Nano* 6, 2002–2030. doi: 10.1039/c9en00265k
- Agroes (2013). El tomate, taxonomía y descripciones botánicas. <https://www.agroes.es/cultivos-agricultura/cultivos-huerta-horticultura/tomate/339-tomate-descripcion-morfologia-y-ciclo>
- AgronoBlog (2025). Dominando las etapas fenológicas del tomate: Estrategias avanzadas para una cosecha abundante y de calidad superior. <https://agronoblog.com/etapas-fenologicas/dominando-las-etapas-fenologicas-del-tomate-estrategias-avanzadas-para-una-cosecha-abu>
- Agrosavia. (2023). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma y perspectivas. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36978/Ver_Documento_36978.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. Esa Working Papers, No. 12-03 (Rome: FAO).
- Alfonso, E.T., Leyva, Á., y Hernández, A. 2018. Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). Revista colombiana de Biotecnología. 7(2): 47-54.
- Anthony Brian Suarez Fernández (2025). *Solanum lycopersicum*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/477328939/Solanum-lycopersicum>
- Areej, A. (2024). El papel de los biofertilizantes en la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. Revista de Investigación EMAN. <https://publishing.emanresearch.org/Journal/abstract/agriculture-2110005>
- Arumugam, A., Selvaraj, JP y Palaniappan, T. (2025). Aplicación de nanotubos de carbono para la agricultura sostenible. Revista Internacional de Investigación en Agronomía, 8 (1), 564-568. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i1h.2464>
- AZoNano. (2025). Nanotubos de carbono: Una solución para la mejora del suelo y los cultivos. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6897>
- Bioprotection Portal. (2025). Tomato pests guide. <https://bioprotectionportal.com/es/resources/tomato-pests-guide/>
- Blanca, J., Montero-Pau, J., Sauvage, C., Bauchet, G., Illa, E., Díez, M. J., & Cañizares, J. (2015). Genomic variation in tomato, from wild ancestors to contemporary breeding accessions. *BMC Genomics*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1444-1>
- Blanca, J., & Cañizares, J. (2022). La domesticación del tomate en América: un viaje de ida y vuelta. <https://doi.org/10.64628/aa0.ang6twqca>

- BlogAgricultura (2025). Etapas fenológicas del cultivo del tomate. <https://blogagricultura.com/etapas-fenologicas-tomate/>
- Bugueño-Guerrero, F. I., Catalán-Barrera, O., Carballo-Sánchez, M. P. (2024). Effect of a plant growth-promoting rhizobacteria consortium to promote growth in lettuce (*Lactuca sativa L.*) and chilli pepper (*Capsicum annuum L.*). Mexican Journal of Biotechnology, 9(2), abril-junio 2024. <https://socibiotech.com/journals/mexbiotechnol/article/view/51>
- Camacho-Rodríguez, M., Almaraz-Suárez, J. J., Vázquez-Vázquez, C., Angulo-Castro, A., Ríos-Vega, M. E. & González-Mancilla, A. (2022). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on the growth and yield of jalapeño pepper. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(spe28), 185–196. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342022001000185&lng=es
- Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). "Tomate mexicano, fuente de betacaroteno y licopeno." 2020. Reporte sobre componentes bioactivos y beneficios en la salud derivados del consumo de licopeno y betacaroteno en tomate. <https://www.ciad.mx/tomate-mexicano-fuente-de-betacaroteno-y-licopeno/>
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & Nagpal, A. K. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. Journal of Food Science and Technology, 55, 2833– 2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
- Collins EJ, Bowyer C, Tsouza A, Chopra M. (2022) Tomatoes: An Extensive Review of the Associated Health Impacts of Tomatoes and Factors That Can Affect Their Cultivation. *Biology (Basel)*. 11(2):239. doi: 10.3390/biology11020239. PMID: 35205105; PMCID: PMC8869745.
- Costa E, Cardoso ED, Junior DBL (2018). Producción de tomate cherry en diferentes sustratos orgánicos bajo condiciones de ambiente protegido. Revista Australiana de Ciencia de los Cultivos 12: 87-92
- Délices, Otto Raúl Leyva Ovalle, Claudio Mota-Vargas, Rosalía Núñez Pastrana, Roberto Gámez Pastrana, Pablo Andrés Meza & Ricardo Serna-Lagunes (2019). Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. cerasiforme (Solanaceae) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México): patrón de diversificación ambiental. Revista de Biología Tropical, 67(4). http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442019000401023
- Díaz Varela, JY, Burciaga Jurado, LG, Olivas Armendáriz, IO, y Peña Rodríguez, CAM (2024). El papel de los nanotubos de carbono multipared en la mejora de la hidrólisis y la estabilidad térmica del PLA. *Scientific Reports*, 14 (1), Artículo 8405. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58755-8>
- Editorial hazlo. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna: Sus avances, desafíos y perspectivas. Revista Colaborativa Multidisciplinaria, 1 (2). <https://mcjournal.editorialdoso.com/index.php/home/article/view/16>
- El Hjouji, H., Qessaoui, R., Chafiki, S., Mayad, E. H., Houmairi, H., Dari, K., Bencharki, B., & Aassila, H. (2025). Enhancement of tomato growth through rhizobacteria and biocontrol of associated diseases. *Life*, 15(7), Article 997. <https://doi.org/10.3390/life15070997>

- Esquivel-Cote, L., Gavilanes-Ruiz, M., Cruz-Ortega, R. y Huante, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Acta Biológica Colombiana*, 23 (1), 68-82. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752018000100068
- FAO (2024) Anuario estadístico presenta aportaciones cruciales sobre la sostenibilidad de la agricultura y la seguridad alimentaria mundiales. Newsroom; FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-statistical-yearbook-2024-reveals-critical-insights-on-the-sustainability-of-agriculture-food-security-and-the-importance-of-agrifood-in-employment/es>
- FAOSTAT, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Datos estadísticos agrícolas actualizados hasta 2024. Disponible en: <http://www.fao.org/statistics/es>
- Flores-Duarte, A., et al. (2023). Efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en *Medicago sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662023000100112
- Fornaris, G. J. (2016). Características de la planta de tomate. Universidad de Puerto Rico. <https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/TOMATE-Caracteristicas-de-la-Planta-v2007.pdf>
- Gashash, E. A., Osman, N. A., Alsahli, A. A., Hewait, H. M., Ashmawi, A. E., Alshallash, K. S., El-Taher, A. M., Azab, E. S., Abd El-Raouf, H. S., & Ibrahim, M. F. M. (2022). Effects of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Cyanobacteria on Botanical Characteristics of Tomato (*Solanum lycopersicon* L.) Plants. *Plants*, 11(20), 2732. <https://doi.org/10.3390/plants11202732>
- Giraldo, JP, Landry, MP, Faltermeier, SM, McNicholas, TP, Iverson, NM, Boghossian, AA, Reuel, NF, Hilmer, AJ, Ticci, S. y Kruss, S. (2022). Ingeniería de plantas con nanotubos de carbono: Una nanotecnología sostenible para la agricultura. *Nano Convergencia*, 9 (1), 1-20.
- Gollagi, S. G., Jasmitha, B. G., Sreekanth H. S. (2019). A review on: Paclobutrazol a boon for fruit crop production. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8 (3), 2686-2691. <https://www.phytojournal.com/archives/?year=2019&vol=8&issue=3&ArticleId=8417&si=false>
- Gómez, LF, et al. (2017). Mecanismo de acción de cinco microorganismos bioinoculantes. *Acta Agronómica*, 66 (1), 2-12. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-01352017000100002
- Gómez-Quintero, LM, et al. (2023). Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: Revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 13 (2). <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v13n2a05>
- González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Alpuche-Solís, Á. G., Cabrera, R. I., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Carbon nanotubes decrease the negative impact of *Alternaria solani* in tomato crop. *Nanomaterials*, 11(5), Article 1080. <https://doi.org/10.3390/nano11051080>

- González-García, Y., López-Vargas, E. R., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Valdés-Reyna, J., Pérez-Labrada, F., & Juárez-Maldonado, A. (2022). Seed Priming with Carbon Nanomaterials Improves the Bioactive Compounds of Tomato Plants under Saline Stress. *Plants*, 11(15), 1984. <https://doi.org/10.3390/plants11151984>
- González Rodríguez, G. (2017). Efecto de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Afrodita en invernadero. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. <http://repositorio.aaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42381>
- Habtamu, M., Mulugeta, K., & Fassil, A. (2022). Plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *International Journal of Microbiology*, 2022, Article 1489637. <https://doi.org/10.1155/2022/1489637>
- Hadebe, ST (2025). Aplicaciones nanotecnológicas para mejorar la tolerancia a la sequía en cultivos. En *Nanotecnología en la agricultura* (pp. 1-20). Saltador. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-1848-4_11
- Hamid Razifard, Alexis Ramos, Audrey L. Della Valle, Cooper Bodary, Erika Goetz, Elizabeth J. Manser, Xiang Li, Lei Zhang, Visa de Sofía, Denise Tieman, Esther van der Knaap, y Ana L. Caicedo (2020) Evidencia genómica de la compleja historia de domesticación del tomate cultivado en América Latina <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-agraria-la-molina/botanica-economica/rassifad-et-al-2020-tomato-complex-domestication-compressed/89730035>
- Hao, Y., et al. (2023). Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. *Plants*, 12(8), 1604. <https://doi.org/10.3390/plants12081604>
- Hernández-Amador, E., Montesdeoca-Flores, D. T., Abreu-Acosta, N., & Luis-Jorge, J. C. (2024). Effects of rhizobacteria strains on plant growth promotion in tomatoes (*Solanum lycopersicum*). *Plants*, 13(23), 3280. <https://doi.org/10.3390/plants13233280>.
- Hu, Y., Li, B., Zhang, Z., Wang, J. (2022). Farm size and agricultural technology progress: Evidence from China. *J. Rural Stud.* 93, 417–429. doi: 10.1016/j.jrurstud.2019.01.009
- InfoAgronomo. (2023). Fenología del tomate. <https://infoagronomo.net/fenologia-del-tomate/>
- InfoAgro (2023). Morfología del Tomate. <https://infoagro.com.ar/morfologia-del-tomate/>
- INRAE (Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente). (2023) Lista de enfermedades y plagas del tomate. <http://ephytia.inra.fr/es/C/4941/Tomate-Tomate-Lista-de-enfermedades-y-plagas>
- Jain, N., Kourampi, I., Umar, T. P., Almansoor, Z. R., Anand, A., Ur Rehman, M. E. (2023). Global population surpasses eight billion: Are we ready for the next billion? *AIMS Public Health* 10, 849–866. doi: 10.3934/publichealth.2023056
- Joshi, A., Kaur, S., Singh, P., Dharamvir, K., Nayyar, H., & Verma, G. (2018). Tracking multi-walled carbon nanotubes inside oat (*Avena sativa* L.) plants and assessing their effect on growth, yield, and mammalian (human) cell 38 viability. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 8(6), 1399–1414. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0801-1>

- Kayess, O., Rahman, L., Ahmed, K., Khan, R., Hossan, S., Hossain, M. S., Khanam, M. M. and Pal, D. C. (2020). Effect of salinity stress on different root and shoot traits of selected tomato cultivars. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.9734/AJARR/2020/v8i130188>
- Khodakovskaya MV, Kim BS, Kim JN, Alimohammadi M, Dervishi E, Mustafa T, Cernigla CE. (2013). Nanotubos de carbono como reguladores del crecimiento de las plantas: efectos sobre el crecimiento del tomate, el sistema reproductivo y la comunidad microbiana del suelo. *Pequeño*. 9(1):115-23. doi: 10.1002/smll.201201225. Epub 2012 Sep 28. PMID: 23019062.
- Liné, C., Manent, F., Wolinski, A., Flahaut, E., & Larue, C. (2021). Comparative study of response of four crop species exposed to carbon nanotube contamination in soil. *Chemosphere*, 274, Article 129854. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129854>
- Lobato-Ureche, M. A., Pérez-Rodríguez, M. M., Malovini, E. J., Piccoli, P. N., Monasterio, R. P. & Cohen, A. C. (2023). Native plant growth promoting rhizobacteria improve the growth of pepper seedlings and modify the phenolic compounds profile. *Rhizosphere*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100800>
- Long, J., Wang, X., & Zhang, W. (2024). Combined toxicity of multiwall carbon nanotubes and cadmium on rice (*Oryza sativa* L.) growth in soil. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1469172. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1469172>
- Lowry, G. V., Avellan, A., Gilbertson, L. M. (2019). Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nat. Nanotechnol.* 14, 517–522. doi: 10.1038/s41565-019-0461-7
- Luna Martínez, L., Pérez Limón, F., & Rodríguez Almazán, C. (2013). Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto promotor del crecimiento en plántulas de tomate y pimiento. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 63-72. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100007
- Luo, X., Li, J., Guo, S., Yu, H., Zeng, X., Zhou, Z., Shangguan, Y., He, M., Ouyang, Y., Chen, K., Chen, Z., & Qin, Y. (2025). Analysis of research status and trends on nano-agricultural application: A bibliometric study. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1530629>
- Mata-Nicolás, E., Palacios-López, E. E., Peña-Ortega, M., Peña-Ortega, J. E., & Peña-Ortega, G. (2022). Diversidad morfológica de fruto de una colección de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) mediante fenotipado basado en imágenes digitales. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(3), 200051. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2022.130200051> Mata-Nicolás, E., et al. (2021). Diversidad morfológica de fruto de una colección de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) mediante fenotipado basado en imágenes digitales. *Agronomy*, 11(8). http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942022000200051
- McGehee, D. L., Lahiani, M. H., Irin, F., Green, M. J., & Khodakovskaya, M. V. (2017). Multiwalled carbon nanotubes dramatically affect the fruit metabolome of exposed tomato

- plants. ACS Applied Materials & Interfaces, 9(38), 32430–32435. <https://doi.org/10.1021/acsmami.7b10511>
- Medina-Peralta, P. A., Preciado-Rangel, P., García-López, E. A., Hernández-Pérez, A., & Espinosa-Victoria, D. (2018). Influence of rhizobacteria in production and nutraceutical quality of tomato fruits under greenhouse conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 367-378. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1552>
- Meutia, R. I., Syafruddin, & Bakhtiar, B. (2023). Performance of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) isolated from sandy soil on growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Agro Bali: Agricultural Journal, 7(3), 752–759. <https://doi.org/10.37637/ab.v7i3.1793>
- Mustafa, S., Kabir, S., Shabbir, U., y Batool, R. 2029. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la agricultura sostenible: del enfoque teórico al pragmático. Simbiosis. 78(2): 115-123. <https://doi.org/10.1007/s13199-019-00602-w>.
- Navarro-González, I., & Periago, M. J. (2016). El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? Revista Española de Nutrición Humana y Dietética, 20(4), 323-335. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2174-51452016000400008
- Nawab A, Alam F, Hasnain A (2017). Almidón de semilla de mango como un novedoso recubrimiento comestible para mejorar la vida útil de la fruta de tomate (*Solanum lycopersicum*). Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas 103: 581-586. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.057>
- Observatorio Tecnológico del Tomate. (2025). Producción mundial de tomate 2024. <https://observatorioagroalimentario.com/observatoriotomate/produccion>
- Pagano, M., Lunetta, E., Belli, F., Mocarli, G., Cocozza, C., & Cacciotti, I. (2025). Advancements in agricultural nanotechnology: An updated review. Plants, 14(18), 2939. <https://doi.org/10.3390/plants14182939>
- Palacio-Rodríguez, R., et al. (2022). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on tomato under commercial shade-house conditions. Revista Chapingo Serie Horticultura. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342022001000231&script=sci_arttext&tlang=en
- Pandey, K., Singh, R. y Singh, P. (2019). Mejora de características de valor comercial en cultivos industriales mediante la aplicación de nanotecnología. Scientific Reports, 9 (1), 19289. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55903-3>
- Patel, A., Tiwari, S., Parihar, P., Singh, R., & Prasad, S. M. (2019). Carbon Nanotubes as Plant Growth Regulators. In Nanomaterials in Plants, Algae and Microorganisms. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811488-9.00002-0>
- Pérez-Bernal, S., Sekar, J., Pravathy, VR, Mathimaran, N., Thimmegowda, MN, Bagyaraj, DJ y Kahmen, A. (2025). Los biofertilizantes mejoran la eficiencia del uso del suelo en cultivos intercalados en diferentes mezclas de cultivos y disposiciones espaciales. Frontiers in Agronomy, 7, Artículo 1562589. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1562589>

- Raliya, R., Saharan, B., Dimkpa, C. y Biswas, P. (2019). Aplicaciones de la nanotecnología en el crecimiento vegetal y la protección de cultivos: Una revisión. *Molecules*, 24 (14), 2558. <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
- Riah, W., Laval, K., Laroche-Ajzenberg, E., Mougin, C., Latour, X., y Trinsoutrot-Gattin, I. 2014. Efectos de los plaguicidas en las enzimas del suelo: una revisión. *Cartas de química ambiental*. 12(2): 257-273. 10.1007/s10311-014-0458-2.
- Ruiz-Romero, P., Preciado-Rangel, P., & Mendoza-Pérez, J. A. (2022). Promoción del crecimiento de tomate saladette con *Bacillus cereus* y estiércol solarizado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7), 1259-1270. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.259>
- RuralCat (2018). Dossier Tècnic Núm.94. El tomàquet de Penjar. Barcelona: Direcció General d'Alimentació, Qualitat i Indústries Agroalimentàries.
- Safdar, M., Kim, W., Park, S., Gwon, Y., Kim, Y.-O., & Kim, J. (2022). Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *Journal of Nanobiotechnology*, 20, 275. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01483-w>
- Salas-Pérez L. et al. "Calidad biofísica y nutracéutica de frutos de tomate." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2016. Análisis del contenido nutracéutico del tomate y su variabilidad según variedades. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000200310
- Salazar-García (2022), S., et al. "La calidad del fruto de tomate entre racimos: mejora por fertilización con potasio." *Revista Fitotecnia Mexicana*. Disponible en: <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/1116>
- Schouten, H. J., et al. (2019). Breeding has increased the diversity of cultivated tomato in the Netherlands. *Frontiers in Plant Science*, 10.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2024). Producción de tomate en México en 2024. Informe de Expectativas Agroalimentarias. <https://www.debate.com.mx/economia/La-SADER-estima-8.8-mas-en-produccion-de-tomate-en-2024-20240722-0181.html>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2025. Producción y superficie sembrada de jitomate en México, 2020-2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- Shi, J., Yan, H., Xu, M., Feng, J., Liu, J. y Zhang, W. (2023). Los nanotubos de carbono multipared promueven la acumulación, distribución y asimilación de ^{15}N -KNO₃ en *Malus hupehensis* al penetrar en las raíces. *Frontiers in Plant Science*, 14 , Artículo 1131978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1131978>
- Sigala-Aguilar, N. A., Flores-Rentería, D., Vera-Reyes, I., Moya-Cadena, S., Fernández-Luqueño, F., & López, M. G. (2025). Multi-Walled Carbon Nanotubes: Effect on the Growth-Development of Tomato Plants (*Solanum lycopersicum* L.), Biocompounds Content in Tomato Fruits and Quality Indicators of Cultivated Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(3), 6840-6860. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02566-x>

USDA Plants Database. (2025). Classification for Kingdom Plantae Down to Species Solanum lycopersicum L. Usda.gov. <https://plants.usda.gov/classification/55438>

Wang, M., Sun, G., Li, G., Hu, G., Fu, L., Hu, S., Yang, J., Wang, Z., & Gu, W. (2024). Effects of multi walled carbon nanotubes and nano-SiO₂ on key enzymes for seed germination and endogenous hormone level in maize seedling. *Agronomy*, 14(12), 2908. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122908>

Watanabe M, Ohta Y, Licang S, Motoyama N, Kikuchi J (2015). Perfilado de contenidos de metabolitos solubles en agua y nutrientes minerales para evaluar los efectos de pesticidas y fertilizantes orgánicos y químicos en la calidad del fruto de tomate. *Química de los alimentos* 169: 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.155>

World Processing Tomato Council. (2024). Global tomato processing volume report 2024. Recuperado de <https://www.wptc.to>

Zhao, L., Bai, T., Wei, H., Gardea-Torresdey, J. L., Keller, A., White, J. C. (2022). Nanobiotechnology-based strategies for enhanced crop stress resilience. *Nat. Food* 3, 829–836. doi: 10.1038/s43016-022-00596-7