

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



***Trichoderma asperellum* EN EL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DEL CULTIVO
DE TOMATE SALADETTE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO CONDICIONES DE
INVERNADERO**

Por:

CARLOS RODRÍGUEZ CÁRDENAS

TESIS

Presentada como requisito parcial

para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Trichoderma asperellum EN EL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DEL
CULTIVO DE TOMATE SALADETTE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO

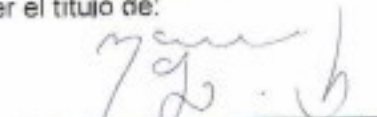
Presentada por:

CARLOS RODRÍGUEZ CÁRDENAS
TESIS
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

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


M.C. Etelberto Cortez Quevedo

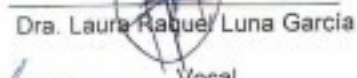
Presidente


Dra. Nadia Landero Valenzuela

Vocal


Dra. Carmen Alicia Ayala Contreras

Vocal


Dra. Laura Raquel Luna García

Vocal



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Trichoderma asperellum EN EL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DEL
CULTIVO DE TOMATE SALADETTE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO

Presentada por:

CARLOS RODRÍGUEZ CÁRDENAS


TESIS


INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:


Dra. Nadia Landero Valenzuela


Dra. Carmen Alicia Ayala Contreras


M.C. Etelberto Cortez Quevedo


Dra. Laura Raquel Luna García

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2025

Declaración de Originalidad y Ausencia de Plagio

El autor de la presente tesis declara bajo protesta de decir verdad que el trabajo de investigación que se presenta es de su autoría y que fue elaborado de manera original, sin incurrir en plagio ni en ninguna otra falta a la ética académica. Se manifiesta que no se ha reproducido total ni parcialmente ningún texto, imagen, gráfica, dato o material de otros autores sin el debido reconocimiento de la fuente; que no se han utilizado trabajos ajenos como propios; que no se ha incurrido en autoplagio mediante la reutilización de trabajos previamente publicados sin referencia; y que todas las fuentes de información consultadas han sido debidamente citadas de acuerdo con la normativa correspondiente. Asimismo, se reconoce que cualquier omisión o falsedad en esta declaración conlleva responsabilidades académicas y legales, por lo que el autor asume plenamente las consecuencias que pudieran derivarse en caso de comprobarse lo contrario, afirmando que el presente documento es un trabajo original.

Presante



Carlos Rodríguez Cárdenas

DEDICATORIA

A mi familia, que es el pilar más grande de mi vida y el motor que me impulsa a seguir adelante aun en los días más difíciles. Gracias por su apoyo incondicional, por su amor, paciencia y por creer en mí en todo momento. Ustedes me han formado como una persona de bien y me han enseñado que, aun en medio de la oscuridad, siempre hay una luz que nos guía. Este logro también es de ustedes.

A mis queridos padres

Esta tesis se la dedico con todo el esfuerzo a **Guadalupe Cárdena Mata** y **Carlos Rodríguez Hernández** a quien me sobran las palabras para expresar cuanto los quiero y significan en mi vida a quien han formado una persona de bien a través de sus consejos y enseñanzas me han dado el claro ejemplo que puedo afrontar cualquier situación por más difícil sea.

A mi hermana mayor **Evelia Rodríguez Cárdenas** que a través de mi vida ha aguantado a una persona un poco desordenada y un poco imperativa y siempre ha dado la cara por mi ella ha sido una admiración para mí porque ha trabajado tanto para conseguir sus metas y a pesar de todo siempre ha seguido adelante

A mi hermanita **Carina Rodríguez Cárdenas** a quien admiro mucho por ser una persona que sido alguien muy aferrada y resiliente para lograr sus metas, aunque sea muy difícil la batalla para lograrlo y a quien siempre sobresale por ser una gran persona muy inteligente.

A mi abuelita **Celerina Hernández** a quien siempre me ha apoyado en mi carrera y una persona que nunca se ha olvidado de mí siempre ha estado presente y le tengo una gran admiración y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, primeramente, por protegerme y permitirme llegar con salud a este momento tan importante de mi vida; por brindarme sabiduría, fortaleza y resiliencia para seguir adelante en cada etapa de este camino.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi *alma mater*, por ser el espacio donde forjé mis conocimientos, sueños y metas a lo largo de mi formación profesional, y donde aprendí que la perseverancia y la constancia son fundamentales para alcanzar toda cosecha.

A mis profesoras, la **Dra. Nadia Landero Valenzuela**, por ser una gran persona y brindarme su apoyo incondicional en todo momento; le agradezco profundamente su paciencia, por su guía firme y acompañamiento durante este proceso. A la **Dra. Carmen Alicia Ayala Contreras**, por su valioso apoyo, orientación y gran paciencia, que fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mis amigos: Ricardo Martínez Carrillo, Lisa soe Pérez Guzmán, José Adrián Nieto Sánchez, Felipe Eduardo Antonio Cruz, Cesar mata Ruiz, Jesús Andrés Tapia Bárcenas, Sandra Lisset Escalera Corrales, Daniela Hernández Licea, Margarita torrez, Andrea Montero, Daysi Mejia, Luis Neri, Diana Muños, Ernesto nieto, Alfonso Miranda, Heriberto Torres, Giselle Hernández, Mireya Sánchez, Andrés Tovar. por convertirse en una segunda familia durante este camino. Gracias por cada palabra de ánimo, por las risas en los momentos difíciles, por su apoyo incondicional y por caminar a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida. Su amistad fue un impulso constante para no rendirme y seguir adelante hasta alcanzar esta meta. A todos mis amigos quiero que sepan que “You’ll never walk alone”.

Al final somos una mezcla de todas las personas que han sido parte de nuestro camino. Me alegra saber que algunas de ellas son parte esencial de quien soy hoy

ÍNDICE

Declaración de Originalidad y Ausencia de Plagio	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2.OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. HIPÓTESIS	14
4. REVISIÓN DE LITERATURA	15
4.1. Importancia económica y social del tomate en México	15
4.2 Características morfológicas del tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L).....	16
4.3 Descripción botánica.....	17
4.4 Requerimientos agroclimáticos.....	19
4.4.1 Temperatura	19
4.5 Principales etapas fenológicas del cultivo.....	19
4.5.1 Etapa de germinación y emergencia.....	19
4.5.2 Etapa vegetativa (plántula a floración).....	20
4.5.3 Etapa reproductiva (floración a fructificación).	20
4.5.4 Etapa de desarrollo y maduración del fruto.	21
4.6 Nutrición del cultivo del tomate	21
4.7 <i>Trichoderma</i> spp: generalidades y clasificación	22
4.7.1 Generalidades de <i>Trichoderma</i> spp.....	22
4.7.2 Clasificación de <i>Trichoderma</i> spp.....	22
4.8 Taxonomía y morfología del género <i>Trichoderma</i>	23
4.8.1Clasificación Taxonómica	23
4.8.2 Morfología de <i>Trichoderma</i>	23
4.9 Distribución y ecología en suelos agrícolas	24
4.10 Especies con interés agrícola.....	25
4.10.1 <i>Trichoderma harzianum</i>	25

4.10.2 <i>Trichoderma asperellum</i>	25
4.10.3 <i>Trichoderma viride</i>	26
4.11 Mecanismos de acción de <i>Trichoderma</i> en la rizosfera	26
4.11.1 Competencia por espacio y nutrientes	27
4.11.2 Producción de Metabolitos Secundarios con Actividad Antifúngica y Antibacteriana	27
4.11.3 Producción y modulación de fitohormonas	28
4.11.4 Solubilización de nutrientes y mejora en la absorción.....	29
4.11.5 Interacción simbiótica con raíces.....	29
4.11.6 <i>Trichoderma</i> como promotor del crecimiento vegetal.....	30
4.11.7 Estimulación del crecimiento radicular y aéreo	32
4.11.8 Inducción de resistencia sistémica en plantas.....	33
4.11.9 Aumento en el rendimiento y calidad de frutos.....	33
4.12 Casos documentados en cultivos hortícolas	34
4.12.1 Evidencia en Cultivos Hortícolas Generales	34
4.12.2 Casos documentados en el cultivo de tomate	35
4.13 Evidencia científica del uso de <i>Trichoderma</i> en tomate.....	36
4.14 Ensayos de campo e invernadero	37
<i>Trichoderma harzianum</i>	37
<i>Trichoderma viride</i>	38
4.15 Efectos en variables morfológicas y fisiológicas.....	39
4.15.1 Efectos en Variables Morfológicas.....	39
4.15.2 Efectos en Variables Fisiológicas	40
4.16 Influencia en parámetros de calidad del fruto	41
4.16.1 Atributos Organolépticos y Nutricionales.....	41
4.16.2 Atributos físicos y vida útil poscosecha	41
4.17 Comparación con bioestimulantes microbianos y no microbianos.....	42
4.18 Comparación con tratamientos convencionales (Agroquímicos)	43
4.19 Perspectivas del uso de <i>Trichoderma</i> en la agricultura sostenible	44
4.19.1 Hacia una agricultura resiliente y ecológica	44
4.19.2 Optimización de recursos y eficiencia agronómica	44
4.19.3 Innovación y desarrollo tecnológico	45
4.20 Ventajas frente a insumos sintéticos.....	45

4.20.1 Sostenibilidad ambiental y salud del ecosistema.....	45
4.20.2 Eficiencia agronómica y resiliencia del cultivo	46
4.20.3 Seguridad alimentaria y beneficios para la salud humana.....	47
4.21 Aplicación en programas de manejo integrado del cultivo	47
4.21.1 <i>Trichoderma</i> como componente central del manejo integrado de plagas (MIP).....	47
4.21.2 <i>Trichoderma</i> como Bioestimulante en el Manejo Integrado de Nutrición (MIN).....	48
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
5.1 Descripción del área de estudio.....	49
5.2 Material Vegetal.....	49
5.3 Material fúngico	50
5.3.1 Resiembra de <i>Trichoderma asperellum</i>	50
5.3.2 Reproducción de <i>Trichoderma asperellum</i> en arroz.....	50
5.3.3 Preparación del inóculo	51
5.4 Bioensayo <i>in situ</i>	51
5.4.1 Inoculación de plantas con <i>Trichoderma asperellum</i>	52
5.4.2 Aplicación de fertilizantes minerales.....	53
5.4.3 Cosecha	53
5.5 variables.....	54
5.5.1 Agronómicas	54
5.5.2 Calidad del fruto	55
5.5.3 Análisis estadístico	56
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1 Longitud del tallo en bolsa y maceta	57
6.2 Diámetro del tallo en bolsa y maceta	59
6.3 Entrenudos de planta en bolsa y maceta.....	62
6.4 Peso del fruto en bolsas y macetas	64
6.5 Diámetro ecuatorial del fruto en bolsas y macetas.....	67
6.6 Diámetro polar del fruto en bolsas y maceta	69
6.7 Solidos solubles totales del fruto en bolsas y macetas	71
7.CONCLUSIÓN	75
8.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE CUADRO

Cuadro 1. Clasificación taxonómica	16
Cuadro 2. Taxonomía del Trichoderma de acuerdo a (Villegas, 2005, citado por Mejía 2025).	23
Cuadro 3. Altura de planta de tomate en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de trichoderma y fertilización convencional.	58
Cuadro 4. Diámetro del tallo en planta de tomate con bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	60
Cuadro 5. Entrenudos en planta de tomate con bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	63
Cuadro 6. Peso del fruto de plantas de tomate en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	65
Cuadro 7. Diámetro ecuatorial del fruto de tomate en plantas con bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	68
Cuadro 8. Diámetro polar del fruto de tomate en plantas con bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	70
Cuadro 9. Solidos solubles totales (Brix) de tomate de plantas en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de Trichoderma y fertilización convencional.	73

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Vista satelital del sitio experimental en la UAAAN. Fuente: Imagen de Google Earth (2025). imagen capturada el 25 de septiembre de 2025.	49
Figura 2. Establecimiento del experimento y tratamientos aplicados: Tr: aplicación de Trichoderma; F: aplicación de fertilizante; Tr+F: Trichoderma más fertilizante y T0: testigo absoluto (sin fertilización ni Trichoderma).	52

RESUMEN

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los más importantes a nivel mundial debido a su alto valor nutricional y económico, es por ello que requiere manejo nutrimental preciso y alternativas sostenibles para mejorar rendimiento y calidad; en este estudio se evaluó la respuesta del cultivo al uso de *Trichoderma asperellum* y a la fertilización convencional en plantas establecidas en maceta y en bolsas. El objetivo fue determinar si la inoculación con *T. asperellum*, sola (Tr) o combinada con fertilización (Tr+F), modifica crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad del fruto en tres momentos durante la cosecha, contando con un testigo absoluto (T0) y un testigo solo con fertilización convencional (F). Se midieron longitud de tallo, diámetro de tallo, número de entrenudos (crecimiento vegetativo); peso del fruto (rendimiento); diámetro ecuatorial y polar y sólidos solubles totales °Brix (calidad). Los resultados muestran que en bolsa no hubo diferencias entre tratamientos, mientras que en maceta Tr+F y F destacaron por mayor longitud, diámetro y número de entrenudos. El peso del fruto presentó mayores valores en maceta en Tr+F y Tr en la última fecha; el diámetro ecuatorial y polar aumentaron significativamente en maceta con Tr+F y Tr en etapas finales; los °Brix fueron superiores en tratamientos con *Trichoderma* en las fechas finales, especialmente en maceta. La combinación de *Trichoderma asperellum* con fertilización convencional mejora el crecimiento, el peso y ciertos atributos de calidad del tomate, efecto más evidente en las plantas establecidas en maceta.

Palabras clave: bioestimulante, rendimiento, Brix, producción.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los sistemas agrícolas de mayor importancia económica a nivel mundial debido a su alta demanda en consumo fresco y en la industria agroalimentaria. En los sistemas de agricultura moderna, el manejo agronómico del tomate incluye prácticas de conducción como el manejo a dos tallos, técnica que favorece el equilibrio fisiológico de la planta al distribuir la energía fotosintética en dos ejes productivos principales (Pérez & López, 2018). Este manejo estructural mejora la aireación del follaje, incrementa la eficiencia de captura de radiación solar, facilita las labores de manejo fitosanitario y permite obtener frutos de mayor calidad comercial. No obstante, al ser un cultivo de alto requerimiento nutricional y sometido a condiciones intensivas, frecuentemente se presentan deficiencias en el aprovechamiento de nutrientes, estrés radicular y problemas asociados a enfermedades del suelo, lo que limita su productividad bajo invernadero (Hernández & Valdez, 2020).

En los últimos años, el uso de microorganismos benéficos del suelo ha generado interés como una alternativa sostenible para reducir la dependencia del uso de agroquímicos sintéticos. Entre estos microorganismos destaca el género *Trichoderma*, un hongo filamentoso reconocido por su capacidad de colonizar eficazmente la rizósfera y establecer interacciones simbióticas con las plantas (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016). Dentro de este género, *Trichoderma asperellum* ha mostrado potencial como bioestimulante del crecimiento y como agente de biocontrol, al inducir cambios fisiológicos y bioquímicos favorables en las plantas y mejorar el aprovechamiento de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (Hermosa *et al.*, 2014). La acción benéfica de *T. asperellum* se atribuye a diversos mecanismos directos e indirectos. Entre los directos se encuentra la producción de metabolitos secundarios y compuestos de naturaleza auxínica, así como la secreción de enzimas hidrolíticas que facilitan la solubilización de nutrientes minerales (Vinale *et al.*, 2008). De manera indirecta, promueve la resistencia sistémica inducida en las plantas, estimulando la activación de defensas naturales que reducen el impacto de patógenos del suelo

(Mastouri *et al.*, 2010). Además, su capacidad de colonización radicular mejora el desarrollo del sistema de raíces secundarias y pelos absorbentes, lo cual incrementa el área de exploración radicular y la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes (Hoyos-Carvajal *et al.*, 2009).

En cultivos hortícolas de importancia económica, como el tomate, la aplicación de *T. asperellum* se ha orientado hacia la promoción del crecimiento vegetal, incremento de biomasa, mayor número de racimos florales, producción de frutos y tolerancia al estrés (Singh *et al.*, 2020). Bajo condiciones de invernadero, donde el ambiente puede ser controlado parcialmente, resulta viable evaluar el comportamiento agro productivo del cultivo sometido a la inoculación de este hongo benéfico, debido a que las condiciones homogéneas del cultivo permiten medir de manera precisa las respuestas fisiológicas y de crecimiento de las plantas (Benítez *et al.*, 2017). El uso de bioestimulantes microbianos como herramientas para mejorar la productividad agrícola representa una alternativa viable y sustentable dentro de los programas de producción hortícola en México. No obstante, persiste la necesidad de investigaciones aplicadas que permitan determinar bajo qué condiciones el hongo *T. asperellum* puede expresar su máximo potencial benéfico en cultivos comerciales como el tomate. Además, la adopción de tecnologías biológicas por parte del sector agrícola requiere evidencia científica sólida que fundamente su implementación en campo y demuestre su impacto positivo en rendimiento y calidad del fruto (López-García *et al.*, 2021).

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la inoculación de *Trichoderma asperellum* en el crecimiento y producción del cultivo de tomate Saladette bajo condiciones de invernadero.

2.2 Objetivos específicos

- Reproducir *Trichoderma asperellum* en un sustrato sólido para su posterior inoculación en plantas de tomate saladette variedad el cid bajo condiciones de invernadero.
- Evaluar el efecto de *Trichoderma asperellum* en el crecimiento y producción de plantas de tomate Saladette variedad el cid, bajo condiciones de invernadero.
- Evaluar el efecto de *Trichoderma asperellum* en la calidad de frutos de tomate saladette variedad el cid de plantas inoculadas bajo condiciones de invernadero.

3. HIPÓTESIS

La inoculación de *Trichoderma asperellum* en plantas de tomate saladette variedad el cid incrementa el crecimiento y producción de las plantas, así como mejora la calidad de los frutos bajo condiciones de invernadero.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Importancia económica y social del tomate en México

México exportó un volumen aproximado de 1.8 a 1.9 millones de toneladas métricas de tomate fresco anualmente en el periodo reciente. Por ejemplo, en 2022, las exportaciones superaron los 1.8 millones de toneladas, manteniendo una consistencia frente a años anteriores (SIAP, 2023a). El valor de estas exportaciones ha superado los 2 mil millones de dólares estadounidenses anuales. En 2022, el valor de las exportaciones de tomate fresco de México alcanzó cerca de los 2.8 mil millones de dólares, lo que representa un incremento significativo en comparación con años previos, reflejando tanto mayores volúmenes como mejores precios de mercado (Banco de México, 2023; SIAP, 2023b). Aproximadamente el 95% o más de las exportaciones de tomate fresco de México tienen como destino el mercado de Estados Unidos (USDA ERS, 2023).

Desde una perspectiva económica, la producción de tomate se traduce en la generación de divisas significativas. México se ha posicionado consistentemente como uno de los principales exportadores de tomate fresco a nivel mundial, abasteciendo en gran medida al mercado estadounidense.

El impacto social del cultivo de tomate es igualmente profundo. Es una fuente vital de empleo, especialmente en zonas rurales donde las opciones laborales pueden ser limitadas. Desde la preparación del suelo y la siembra, hasta la cosecha, empaque y transporte, miles de familias dependen directa e indirectamente de esta actividad (INEGI, 2022). Las comunidades agrícolas que se especializan en tomate experimentan dinámicas sociales particulares, con migraciones laborales temporales y el desarrollo de saberes culturales asociados al ciclo del cultivo. La dignidad del trabajo en el campo, aunque a menudo desafiante, se materializa en el sustento de hogares y en la cohesión comunitaria que fomenta el compartir de experiencias y conocimientos ancestrales y modernos sobre el manejo del cultivo.

Además, el tomate juega un papel crucial en la seguridad alimentaria nacional. Aunque una porción importante de la producción se destina a la exportación, el consumo interno es sustancial. Es un componente esencial de la gastronomía mexicana, presente en innumerables platillos y un referente cultural en la mesa de cada familia. Su accesibilidad y valor nutricional lo convierten en un alimento básico y asequible para la población. La investigación y el desarrollo en variedades más resistentes a plagas y enfermedades, así como más adaptadas a condiciones climáticas cambiantes, buscan asegurar la disponibilidad continua de este alimento vital (CIMMYT, 2019).

4.2 Características morfológicas del tomate (*Solanum lycopersicum* L).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica

Reino	Plantae
Subreino	Viridiplantae
Infrareino	Streptophyta
Superdivision	Embryophyta
Division	Tracheophyta
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Asteranae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	<i>Solanum</i>
Especie	<i>S.lycopercicum</i>

Fuente: (Integrated Taxonomic Information System Report Page: *Solanum Lycopersicum*. 2016 *et al.*, Fandiño Fiquitiva *et al.*, 2016.

El conocimiento de la morfología del tomate es fundamental para comprender sus requerimientos nutricionales y las prácticas de manejo que favorecen su desarrollo. En este sentido, Wien (1997) describe que: La planta de tomate posee flores hermafroditas que constan de 5 o más sépalos e igual número de pétalos de color amarillo dispuestos de forma helicoidal agrupadas en inflorescencias en forma de racimo. Los frutos son redondos con diámetros que varían de los 2.5 a los 6 cm cuyo signo más visible de maduración organoléptica es el cambio de coloración de verde a rojo. El sistema radical de la planta alcanza una profundidad de hasta 2 m con una raíz pivotante y muchas raíces secundarias.

4.3 Descripción botánica

El tomate es una planta vivaz que se cultiva como anual por motivos esencialmente económicos. Su cultivo es tanto más rentable cuanto más corto es su ciclo. La especie presenta un acentuado polimorfismo. El tamaño de la planta, las características vegetativas, los caracteres de las hojas y de los frutos son tan diferentes que existen numerosos cultivadores que producen cada uno un fruto destinado a un uso específico (Gorini, 1999).

En cultivos de crecimiento indeterminado la primera inflorescencia suele aparecer tras la 7^a a 11^a hoja, mientras que en los cultivos determinados aparece normalmente tras la 5^a a 7^a hoja. Aunque las condiciones ambientales pueden alterar estos procesos; si se han producido pocas hojas antes del inicio de la floración, el abastecimiento de fotoasimilados puede ser insuficiente para soportar las flores y el desarrollo de los primeros frutos (Castellanos & Muñoz, 2003).

Raíz: Es el órgano basal de la planta, esencial para su supervivencia y productividad. En el caso del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), una de las hortalizas más importantes a nivel global, el sistema radicular no solo cumple con las funciones primarias de anclaje y absorción de agua y nutrientes, sino que también actúa como un centro neurálgico para la comunicación planta-microorganismo y la síntesis de hormonas que regulan el crecimiento de la parte aérea (Venkateswarlu *et al.*, 2021).

Comprender la anatomía, fisiología y ecología de la raíz del tomate es, por tanto, indispensable para optimizar su cultivo y desarrollar estrategias de manejo más eficientes.

Tallo: Es anguloso y recubierto en toda su extensión de pubescencia, la mayoría de naturaleza glandular que le confiere a la planta un olor característico. Al principio el porte del tallo es erguido, pero llega un momento en que el peso lo hace rastrear y obliga a realizar el tutorado (Nuez. 1995).

Flor: Las particularidades de las inflorescencias (es decir la forma de agruparse de las flores en una planta: en corimbo, encima o en racimo) son importantes. En general, las inflorescencias que se forman en la base son más simples y producen uno o dos frutos; las superiores son más complejas y dan un mayor número de frutos. La floración de una cima no tiene lugar de una sola vez, sino que sigue un orden progresivo desde la base hasta el ápice, por lo que en un mismo racimo encontraremos al mismo tiempo frutos verdes, flores abiertas y botones florales. (Gorini, 1999).

Fruto: El fruto es una baya carnosa de forma variable. Se cultivan variedades de fruto redondo, ovalado o acostillado. Interiormente y trazado una sección transversal observaremos las cavidades ováricas que contienen numerosas semillas diseminadas en un medio gelatinoso. Puede haber solo dos cavidades, o alcanzar el número de seis o siete. Los pigmentos presentes en el fruto maduro son los antocianos, responsables del color rojo, y los carotenos, responsable del color amarillo. El porcentaje de estos pigmentos viene determinado por los factores genéticos, pero también por el desarrollo, las condiciones climáticas relativas a la temperatura y la luz (Gorini, 1999).

4.4 Requerimientos agroclimáticos

4.4.1 Temperatura

Germinación: Las temperaturas ideales oscilan entre 20 y 30 °C. Temperaturas por debajo de 10 °C o por encima de 35 °C pueden inhibir o retrasar significativamente la germinación (Preciado-Rangel *et al.*, 2018).

Crecimiento Vegetativo y Floración: Para un desarrollo óptimo, las temperaturas diurnas deben estar entre 20 y 28 °C, y las nocturnas entre 15 y 20 °C. Temperaturas nocturnas sostenidas por encima de 22 °C pueden provocar la caída de flores y reducir el cuajado de frutos, así como afectar la calidad del polen (Villalobos *et al.*, 2016).

Fructificación: Durante el desarrollo del fruto, temperaturas de 20 a 25 °C son las más adecuadas para la maduración, la coloración y la acumulación de sólidos solubles (Bartz & Brecht, 2018). Temperaturas inferiores a 10 °C o superiores a 30 °C pueden ralentizar la maduración, afectar el color (amarillo en lugar de rojo intenso por inhibición del licopeno) y reducir la firmeza.

Suelo: Aunque adaptable, el tomate prefiere suelos bien drenados, con buena capacidad de retención de humedad, ricos en materia orgánica y con un pH ligeramente ácido a neutro (6.0-7.0) (Porta *et al.*, 2014; reeditado en 2020). La salinidad del suelo es un factor limitante, ya que el tomate es sensible a altos niveles de sales, afectando el crecimiento y el rendimiento (Contreras-Cornejo *et al.*, 2022).

4.5 Principales etapas fenológicas del cultivo

4.5.1 Etapa de germinación y emergencia

El ciclo de vida del tomate comienza con la germinación de la semilla. Esta etapa crítica, que dura entre 5 y 10 días bajo condiciones óptimas, se caracteriza por la absorción de agua (imbibición), la activación metabólica del embrión y la posterior emergencia de la radícula, seguida por el hipocótilo y los cotiledones. La emergencia marca la aparición de las plántulas sobre la superficie del suelo. En esta fase, la planta es extremadamente vulnerable a factores ambientales adversos (temperatura, humedad) y a enfermedades de "damping-off" (caída de plántulas) (Lozada-Ramírez *et al.*, 2017). Para el agricultor, una germinación uniforme y vigorosa

es el primer signo de una buena cosecha, y el cuidado en esta fase es análogo al de los primeros pasos de un ser vivo.

4.5.2 Etapa vegetativa (plántula a floración).

Desarrollo de plántula y primeras hojas verdaderas: Una vez que los cotiledones se expanden y comienzan a realizar fotosíntesis, la planta inicia el desarrollo de sus hojas verdaderas. Esta fase se extiende hasta que la plántula tiene entre 4 y 6 hojas verdaderas y un sistema radicular bien desarrollado, momento ideal para el trasplante. Durante este período, es vital proporcionar una nutrición adecuada y proteger a la plántula de plagas y enfermedades (Salgado-García *et al.*, 2019).

Crecimiento Vegetativo Activo y Ramificación: Una vez trasplantada, la planta de tomate dedica su energía a un intenso crecimiento de tallos, hojas y raíces. La ramificación y el desarrollo de nuevos brotes axilares son característicos de esta fase. La gestión de la poda, el tutorado y la nutrición nitrogenada son prácticas clave para guiar el crecimiento hacia una estructura equilibrada que favorezca la futura floración y fructificación.

4.5.3 Etapa reproductiva (floración a fructificación).

Iniciación Floral y Floración: La iniciación floral ocurre cuando los primordios florales se desarrollan en los meristemas. La floración propiamente dicha comienza con la apertura de las primeras flores, generalmente en los racimos inferiores. En el tomate, las flores son hermafroditas y la polinización es autógama, aunque la vibración (natural por el viento o inducida) mejora la liberación de polen (Castelán-Estrada *et al.*, 2018). Esta etapa es altamente sensible a la temperatura y la humedad, que pueden afectar la viabilidad del polen y la fecundación.

Fecundación y Cuajado de Frutos: Tras la polinización y fecundación, los ovarios de las flores se desarrollan en frutos pequeños, un proceso conocido como cuajado. Las tasas de cuajado son críticas para el rendimiento final. Factores como el estrés hídrico, las temperaturas extremas y las deficiencias nutricionales (especialmente de boro y calcio) pueden afectar negativamente este proceso, causando la caída de flores o frutos recién cuajados (Lozada-Ramírez *et al.*, 2017).

4.5.4 Etapa de desarrollo y maduración del fruto.

Crecimiento y Engorde del Fruto: Una vez cuajados, los frutos experimentan un rápido crecimiento y engorde, acumulando agua, azúcares y otros metabolitos. Durante esta fase, la planta demanda grandes cantidades de agua y nutrientes, especialmente potasio, para el llenado óptimo de los frutos (Salgado-García *et al.*, 2019).

Maduración del Fruto: La maduración es un proceso complejo que implica cambios en el color (de verde a rojo por la síntesis de licopeno), la firmeza (ablandamiento de los tejidos), la composición química (acumulación de azúcares y ácidos orgánicos) y la producción de compuestos volátiles que confieren el aroma y sabor característicos. La maduración ocurre en etapas distintivas (verde maduro, "breaker", rosado, rojo claro, rojo maduro) y el momento de la cosecha se determina según el destino del fruto (fresco, procesamiento) y la distancia al mercado (Castelán-Estrada *et al.*, 2018).

4.6 Nutrición del cultivo del tomate

La nutrición mineral y fisiológica del tomate es un factor determinante para la calidad y productividad del cultivo en condiciones de invernadero. En este sentido, Ramírez *et al.* (2018) afirman que las concentraciones individuales o combinadas de P-Ca, AG4/7 y 6-BAP, favorecen la calidad del tomate Saladette el Cid híbrido 'Raptor-F1' en invernadero.

La nutrición es un factor clave que incide directamente en el desarrollo y productividad del cultivo de tomate. En este contexto, Céspedes *et al.* (2022) fue evaluar influencia de sombra y nutrición sobre desarrollo, rendimiento, calidad de frutos e ingresos. Se usó el diseño parcelas sub-subdivididas, tres repeticiones, 45 tratamientos (cinco variedades, tres niveles de sombra y tres programas de fertilización), y análisis de varianza y comparación por Duncan al 5% (InfoStat, 2018). Se concluyó que la sombra influyó el desarrollo de plantas, rendimiento y calidad de frutos, con efecto sobre temperatura y luminosidad que favorecieron las demás variedades, para mejor adaptabilidad y productividad que la Doterang.

4.7 *Trichoderma* spp: generalidades y clasificación

4.7.1 Generalidades de *Trichoderma* spp.

Trichoderma es un género de hongos filamentosos anamórficos (es decir, se reproducen asexualmente) que pertenecen a la división Ascomycota. Son saprófitos facultativos, lo que significa que pueden vivir de la materia orgánica en descomposición, y son ubicuos en casi todos los tipos de suelos y ambientes terrestres, desde regiones templadas hasta tropicales. Se encuentran comúnmente en la rizosfera (la zona de influencia de las raíces de las plantas), lo que facilita su interacción con los cultivos (Harman *et al.*, 2021).

Macroscópicamente, las colonias de *Trichoderma* en medios de cultivo suelen ser de crecimiento rápido, con una textura algodonosa y una coloración que varía de blanco a diferentes tonos de verde oscuro, debido a la producción de esporas (conidios) (Woo *et al.*, 2018). Microscópicamente, se caracterizan por presentar conidióforos ramificados, que terminan en células fiálides que producen conidios globosos u ovoides.

4.7.2 Clasificación de *Trichoderma* spp.

La taxonomía de *Trichoderma* ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, pasando de una clasificación morfológica a un molecular más precisa.

4.8 Taxonomía y morfología del género *Trichoderma*

4.8.1 Clasificación Taxonómica

Cuadro2. Taxonomía del *Trichoderma* de acuerdo a (Villegas, 2005, citado por Mejía 2025).

Reino	Fungi
División	Mycota
Subdivisión	Eumycota
Clase	Hyphomycetes
Orden	Moniliales
Familia	Moniliaceae
Género	<i>Trichoderma</i>

4.8.2 Morfología de *Trichoderma*

En relación con la morfología y características de crecimiento de *Trichoderma*, Martínez *et al.* (2015) señalan que las colonias de los aislamientos de *Trichoderma* presentan rápido crecimiento. En 1969 Rifai señaló que poseen color blanco y se tornan verde oscuro con abundante esporulación. En general, en medio Papa Dextrosa Agar (PDA) este hongo no presenta micelio aéreo y su pigmentación puede variar desde verde oscuro hasta verde claro y, en ocasiones, tornarse amarillento. Algunos aislamientos tienen olor típico a coco (29, 30). Durante su desarrollo y crecimiento producen hifas de 5 -10 μm de ancho (31) que conforman el micelio septado, con paredes compuestas por quitina y glucano. En cuanto a la estructura reproductiva de *Trichoderma*, Martínez *et al.* (2015) describen que los conidióforos de *Trichoderma* tienen aspecto cónico cuando se observan al microscopio. Producen gran cantidad de conidios asexuales unicelulares de color verde o hialinos, lisos o con paredes muy poco ásperas, subglobosos, cilíndricos, oblongos, con diámetro promedio de 3 a 5 μm . Estos se forman a partir de células conidiógenas y fiálides (singulares o en grupos), que se ubican en los extremos de los conidióforos, los cuales son hialinos muy ramificados y no verticilados.

4.9 Distribución y ecología en suelos agrícolas

De acuerdo con Gorini (1999), el cultivo del tomate presenta una amplia capacidad de adaptación a diferentes tipos de suelo. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen en suelos profundos, frescos, bien drenados y con buena estructura. Es fundamental que el suelo posea una alta concentración de materia orgánica y elementos minerales, además de mantener un pH cercano a 6, ya que valores inferiores a 5.6 o superiores a 7.3 limitan el crecimiento de la planta. Los suelos pesados, con tendencia a formar costras superficiales debido a su composición coloidal, retienen excesiva humedad y pueden provocar condiciones de asfixia radicular que afectan el desarrollo del cultivo.

Los suelos arenosos y ligeros, que es imprescindible mejorar con aportes importantes de materia orgánica y nitrógeno, permiten por el contrario un crecimiento exuberante, pero con pocos nudos y una producción global deficiente. La tomatara se adapta fácilmente a la disponibilidad de agua. En los terrenos bien regados, pueden alcanzar picos de producción impresionantes: 200 toneladas por hectárea. Normalmente la producción media es de 100-130 toneladas por hectárea. También puede desarrollarse en suelos sin regadío, pero en este caso la producción desciende un 20 o 30 toneladas por hectárea. Una buena preparación del terreno es indispensable para asegurar el correcto desarrollo del aparato radical y, como consecuencia, de la planta entera.

4.10 Especies con interés agrícola

4.10.1 *Trichoderma harzianum*

T. harzianum es, quizás, la especie más emblemática y extensamente investigada dentro del género *Trichoderma*. Su popularidad radica en su excepcional capacidad para establecer interacciones beneficiosas con las plantas y su marcado efecto antagónico contra un amplio espectro de fitopatógenos fúngicos y oomicetos (Singh et al., 2020). Los mecanismos de acción de *T. harzianum* son variados e incluyen el micoparasitismo, donde el hongo ataca directamente las hifas de los patógenos; la producción de enzimas líticas como quitinasas y glucanasas; la competencia por nutrientes y espacio; y la inducción de resistencia sistémica en la planta hospedera (ISR) (Sánchez-López et al., 2018).

Además de su función como biocontrolador, *T. harzianum* es un eficaz promotor del crecimiento vegetal. Se ha demostrado que la inoculación con esta especie mejora la absorción de nutrientes, estimula el desarrollo radicular y foliar, y aumenta la tolerancia de las plantas a condiciones de estrés, como la salinidad o la sequía, al modular la expresión génica relacionada con la defensa y el crecimiento (Rosales-López et al., 2021). Su adaptabilidad y robustez en diferentes ambientes lo hacen un candidato ideal para formulaciones comerciales de bioinsumos.

4.10.2 *Trichoderma asperellum*

T. asperellum es otra especie de gran relevancia agrícola, a menudo reconocida por su virulencia y eficiencia como agente de control biológico. Comparte muchos de los mecanismos de acción de *T. harzianum*, incluyendo el micoparasitismo y la producción de compuestos antifúngicos (Druzhinina et al., 2011). Sin embargo, estudios recientes sugieren que *T. asperellum* puede ser particularmente efectivo contra ciertos patógenos de suelo y enfermedades de raíz debido a su capacidad para colonizar activamente el rizoplasma y rizósfera (Almeida et al., 2019).

Esta especie también destaca por su capacidad para solubilizar fosfatos y otros nutrientes del suelo, haciéndolos más disponibles para las plantas, lo que contribuye

directamente a la nutrición y vigor del cultivo. Su aplicación ha mostrado mejoras significativas en el rendimiento de diversos cultivos hortícolas y cereales bajo condiciones de campo, consolidándose como una alternativa valiosa en programas de manejo integrado de plagas y enfermedades (González-Estrada *et al.*, 2023).

4.10.3 *Trichoderma viride*

T. viride fue una de las primeras especies de *Trichoderma* en ser estudiada por sus propiedades antifúngicas, y sigue siendo una opción importante en la agricultura. Aunque quizás menos versátil que *T. harzianum* o *T. asperellum* en algunos aspectos, *T. viride* posee potentes capacidades micoparasíticas y produce metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana (Mukherjee *et al.*, 2018). Su acción se ha documentado contra patógenos como *Sclerotium rolfsii* y *Rhizoctonia solani*, causantes de marchitamientos y pudriciones radiculares en un amplio rango de cultivos.

Al igual que otras especies de *Trichoderma*, *T. viride* también contribuye a la promoción del crecimiento vegetal, aunque su efecto puede variar según la cepa y el cultivo (Chowdhury *et al.*, 2019). La diversidad genética dentro de *T. viride* es considerable, lo que subraya la importancia de seleccionar cepas específicas con características deseables para aplicaciones agrícolas particulares. La investigación continua busca identificar y explotar cepas de *T. viride* con perfiles de acción mejorados.

4.11 Mecanismos de acción de *Trichoderma* en la rizosfera

Los hongos antagonistas desempeñan un papel fundamental en el control biológico de los patógenos que afectan a los cultivos. Dentro de este grupo, las especies del género *Trichoderma* se destacan por su eficacia en la supresión de patógenos fúngicos presentes en el suelo. Estos hongos emplean múltiples mecanismos de acción que les permiten inhibir o controlar a los fitopatógenos, tales como la competencia por nutrientes y espacio, el micoparasitismo, la producción de compuestos antibióticos, la desactivación de enzimas del patógeno y la inducción de resistencia en la planta

huésped. La presencia de varios mecanismos de acción en un mismo aislamiento de *Trichoderma* incrementa la eficiencia y durabilidad del control biológico, superando así la acción limitada de los plaguicidas químicos (Infante, 2009).

4.11.1 Competencia por espacio y nutrientes

Uno de los principales mecanismos mediante los cuales *Trichoderma* controla hongos fitopatógenos es la competencia por espacio y nutrientes. Este hongo crece rápidamente y coloniza el sustrato disponible, ocupando el espacio físico y consumiendo los nutrientes que los patógenos necesitarían para su desarrollo. Al establecerse antes o más eficientemente que el patógeno, *Trichoderma* reduce la probabilidad de que otros hongos puedan crecer, debilitando así su capacidad de infección.

Esta estrategia no depende de la producción de compuestos tóxicos, sino de su ventaja ecológica su rápido crecimiento, alta producción de conidios y adaptabilidad a diferentes sustratos le permite dominar el nicho ecológico. La eficiencia de este mecanismo se incrementa cuando el aislamiento de *Trichoderma* posee un metabolismo versátil y es capaz de utilizar múltiples fuentes de carbono y nitrógeno presentes en el sustrato (Infante *et al.*, 2009; Meyer, 2022).

4.11.2 Producción de Metabolitos Secundarios con Actividad Antifúngica y Antibacteriana

Peptaiboles: Son péptidos no ribosomales que forman canales iónicos en las membranas celulares de los patógenos, interrumpiendo su integridad y función (Vinale *et al.*, 2014). Ejemplos incluyen la alameticina y tricocina, producidos por especies como *T. viride* y *T. harzianum*. Su acción es crucial en el micoparasitismo, donde *Trichoderma* ataca directamente las hifas de los patógenos.

Glucanasas, Quitinasas y Proteasas: Estas enzimas extracelulares son fundamentales en el micoparasitismo, ya que degradan los componentes de la pared celular de los hongos patógenos (quitina, glucanos) y las proteínas (Harman *et al.*, 2021). La producción de estas hidrolasas permite a *Trichoderma* perforar las paredes celulares de sus "presas" y extraer nutrientes.

Compuestos Volátiles Orgánicos (CVOCs): Algunas especies de *Trichoderma* liberan CVOCs que pueden inhibir el crecimiento de patógenos a distancia o incluso promover el crecimiento vegetal. Estos compuestos actúan como señales químicas en el suelo, influyendo en la comunidad microbiana y la fisiología de la planta (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016).

Sideróforos: Son quelantes de hierro de alta afinidad producidos por *Trichoderma* para captar hierro férrico (Fe^{3+}) del ambiente, un nutriente esencial para todos los microorganismos. Al competir eficazmente por el hierro, *Trichoderma* puede privar a los patógenos de este elemento vital, suprimiendo su crecimiento (Sharma *et al.*, 2021).

Otras Moléculas: *Trichoderma* también produce metabolitos como pirone, pironas y óxidos de nitrógeno, que contribuyen a su arsenal biocontrolador y a su interacción con el entorno.

4.11.3 Producción y modulación de fitohormonas

Auxinas: Diversas cepas de *Trichoderma* son capaces de sintetizar y liberar compuestos tipo auxinas (como el ácido indolacético, IAA) o precursores de auxinas (Ortiz-Castro *et al.*, 2017). Las auxinas son fitohormonas esenciales que regulan numerosos procesos de desarrollo, incluyendo la elongación celular, la formación de raíces laterales y pelos radiculares (Sharma *et al.*, 2021). El incremento en el desarrollo del sistema radicular observado con *Trichoderma* es una clara manifestación de esta modulación hormonal, permitiendo a la planta explorar un mayor volumen de suelo para la absorción de agua y nutrientes.

Giberelinas: Aunque en menor medida que las auxinas, algunas especies de *Trichoderma* pueden producir giberelinas, fitohormonas que promueven el crecimiento del tallo, la germinación de semillas y la floración (Woo *et al.*, 2018). Su influencia puede contribuir al vigor general de la planta.

Citoquininas: Se ha sugerido que *Trichoderma* puede modular los niveles de citoquininas en la planta, hormonas que promueven la división celular y el desarrollo de brotes laterales.

Modulación de la Respuesta al Estrés Hormonal: Más allá de la producción directa, *Trichoderma* interactúa con las vías de señalización de hormonas relacionadas con el estrés, como el ácido jasmónico (JA), el etileno (ET) y el ácido salicílico (SA). Al activar estas vías, *Trichoderma* induce Resistencia Sistémica Inducida (ISR), preparando a la planta para una respuesta más rápida y efectiva frente a patógenos e incluso estreses abióticos (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016).

4.11.4 Solubilización de nutrientes y mejora en la absorción

Carvajal (2015) destaca que *Trichoderma* es un género de hongos que contribuye tanto a la supresión de patógenos como al fomento del crecimiento vegetal, al mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes, lo que se refleja en mayores concentraciones foliares en diversas especies. Para evaluar el potencial agrícola de aislamientos nativos colombianos, se realizaron ensayos con siete cepas previamente seleccionadas *in vitro*, midiendo su efecto sobre el crecimiento y la absorción de nutrientes en plantas de frijol cultivadas bajo condiciones de invernadero. Las plantas se establecieron en sustratos de andisol y ultisol, y fueron inoculadas con las diferentes cepas de *Trichoderma*. Durante el desarrollo del cultivo se registraron las etapas de crecimiento y, en la floración, se evaluaron variables como área foliar, número de nudos, materia seca y concentraciones foliares de N, P, K, S, Mg, Ca, Fe, Zn, B, Cu y Mn. Los resultados mostraron que, especialmente en andisoles, la inoculación con ciertos aislamientos aumentó significativamente los niveles foliares de Cu, Fe, Ca, Mg y K.

4.11.5 Interacción simbiótica con raíces

De acuerdo con Esparza (2021), las plantas, al ser las principales productoras dentro de los ecosistemas, mantienen una estrecha interacción con una amplia diversidad de microorganismos que habitan en su entorno. Estos microorganismos dependen de los compuestos ricos en carbono liberados por las raíces —como azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos— para su nutrición. Aunque la mayoría del microbioma fúngico y bacteriano permanece en equilibrio neutro, algunas especies pueden establecer relaciones patogénicas o simbióticas que inciden directamente en la productividad y

adaptación de las plantas. En el contexto de una agricultura sostenible, identificar y caracterizar microorganismos con propiedades probióticas representa una estrategia clave, ya que permite descubrir sustancias biológicamente activas con potencial para el desarrollo de nuevos pesticidas, bioestimulantes y elicitores de defensa vegetal. En este sentido, el género *Trichoderma* ha adquirido una creciente relevancia debido a su versatilidad metabólica y su capacidad para prosperar en ambientes tanto acuáticos como del suelo.

En relación con la interacción simbiótica de *Trichoderma* con las raíces de las plantas, Estrada (2014) menciona que los hongos del género *Trichoderma* son microorganismos cosmopolitas ubicuos, que colonizan las raíces de la planta, con lo cual incrementan en estas el crecimiento, la resistencia a enfermedades y la tolerancia a estrés abióticos. Hoy en día son bien conocidos los efectos benéficos que *Trichoderma* brinda a las plantas; sin embargo, el crecimiento sobre los mecanismos moleculares que median la percepción y reconocimiento del hospedero y que culmina con el establecimiento de una relación simbiótica, a la fecha se desconocen.

4.11.6 *Trichoderma* como promotor del crecimiento vegetal

En la investigación desarrollada por Cubillos (2009) se evaluó el efecto de dos cepas de *Trichoderma harzianum*, una nativa (TCN-014) y una comercial (TCC-005), sobre la germinación y el crecimiento inicial de plantas de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener), tanto en condiciones de laboratorio como de invernadero. Para ello, se prepararon inóculos con concentraciones de 10^4 , 10^6 y 10^8 conidias/mL de cada cepa, los cuales se aplicaron a las semillas, evaluando durante 15 días el número de semillas germinadas, el porcentaje e índice de germinación, así como el tiempo medio de germinación. Las plántulas obtenidas fueron posteriormente trasladadas a invernadero, donde, tras dos meses, se midieron variables morfológicas como altura, grosor del tallo, número de hojas, longitud radicular y peso seco total. Los resultados evidenciaron que todos los tratamientos promovieron tanto la germinación como el desarrollo de las plántulas; no obstante, la cepa nativa, en concentraciones de 10^6 y 10^8 conidias/mL, mostró un desempeño superior en comparación con la cepa comercial. Estos hallazgos destacan el potencial de *T. harzianum* como agente

promotor del crecimiento vegetal y su posible aplicación en el desarrollo de bioproductos destinados al manejo ecológico del cultivo de maracuyá.

Diversos estudios han coincidido en señalar el efecto positivo de *Trichoderma harzianum* en la promoción del crecimiento vegetal. De acuerdo con Cubillos (2009), se han registrado incrementos significativos en el desarrollo de distintas especies vegetales inoculadas con este hongo. Entre los ejemplos destacan el aumento de la biomasa en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*), el mayor vigor y longitud en plántulas de manzana, así como el incremento de biomasa en tomate y un desarrollo radicular más extenso en maíz. Además, se ha observado un mejor crecimiento en diversas especies ornamentales y agrícolas, como crisantemo, petunia, pimienta, lechuga, zanahoria, col, pepino, algodón, guisantes y frijol, tras la aplicación de productos comerciales basados en *Trichoderma*, como Promot Plus®. Estos hallazgos respaldan los resultados obtenidos por el autor, quienes evidenciaron que *T. harzianum* actúa como un eficaz promotor del crecimiento en plantas de maracuyá, mostrando su potencial para el manejo ecológico y sostenible de los cultivos.

En relación con la evaluación de *Trichoderma aggressivum f. europaeum*, Sánchez (2022) señala que: El objetivo general de este trabajo fue la evaluación de *Trichoderma aggressivum f. europaeum* como agente promotor del crecimiento vegetal y de control biológico de enfermedades hortícolas, para el uso en la agricultura. Partiendo de que no es una cepa referenciada como agente promotor del crecimiento vegetal ni como controlador biológico de enfermedades, sino por el contrario es una cepa descrita como generadora del moho verde en cultivos de champiñón (*Agaricus bisporus*). De acuerdo con lo expuesto por Sánchez (2022) la utilización de microorganismos beneficiosos como el género *Trichoderma*, es una de las estrategias más prometedoras para el aumento de la productividad y la reducción del uso de fertilizantes inorgánicos, herbicidas y pesticidas. Para lograr el objetivo general, se plantearon varios objetivos específicos, por medio de las metodologías más adecuadas para la evaluación de *Trichoderma aggressivum f. europaeum*, en los cultivos hortícolas de más interés en la zona de estudio. En este momento nos encontramos en un período de transición hacia un futuro reglamento europeo de

fertilizantes y biocontroladores, aun a la fecha la mayoría de los microorganismos evaluados en la literatura no llegan al mercado comercial.

4.11.7 Estimulación del crecimiento radicular y aéreo

Con el objetivo de evaluar la eficacia de *Rhizobium etli* y *Trichoderma viride* en la estabilidad de la producción hortícola, así como en la protección del medio ambiente y la salud humana, se investigó su efecto sobre plántulas de *Capsicum annum* var. *longum* cultivadas en semilleros con tierra estéril para minimizar la carga microbiana. Se llevaron a cabo tres ensayos, considerando un grupo control tratado con agua destilada estéril, un grupo experimental inoculado con una suspensión de *R. etli* (aproximadamente 10^8 UFC/mL) y otro grupo con una suspensión de *T. viride* (10^8 esporas/mL). Las variables evaluadas incluyeron longitud, peso húmedo y seco de tallo y raíz, como indicadores del crecimiento y desarrollo de las plantas. Los resultados mostraron que ambos microorganismos promovieron el crecimiento de las plántulas, destacando su potencial como PGPR (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal) y PGP (promotores del crecimiento vegetal), constituyendo una alternativa para reducir el uso de fertilizantes químicos (Vazallo, 2013).

Arias (2016) evaluó el comportamiento de dos especies de *Trichoderma* (*T. harzianum* y *T. koningii*) como estimulantes en la inducción de raíces a estacas de mora de castilla. Para cada especie se probaron cinco dosis, midiendo variables como longitud, número y peso seco de las raíces, así como el número de brotes con hojas a 45, 60 y 75 días, comparando los resultados con un control sintético (Ácido alfa-naftalenoacético) y un control absoluto (agua). El experimento se desarrolló mediante un DBCA con tres repeticiones, y los resultados indicaron que ninguna de las dos especies de *Trichoderma* estimuló el desarrollo radicular ni la emisión de brotes con hojas, dado que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las estacas tratadas y los controles.

4.11.8 Inducción de resistencia sistémica en plantas

Meyer (2022) señala que los primeros indicios de la inducción de resistencia sistémica mediada por *Trichoderma* fueron reportados por Calderón *et al.* (1993) en cultivos de vid. Posteriormente, De Meyer *et al.* (1998) evidenciaron este mismo fenómeno en especies como tomate, lechuga, pimentón, frijol y tabaco tratadas con *Trichoderma harzianum* (aislado T39) para el control de *Botrytis cinerea*. En dicho estudio, la aplicación del agente de biocontrol, incluso cuando se encontraba separado físicamente del patógeno, logró reducir entre un 25 y 100% los síntomas del moho gris, debido al retraso o inhibición en la formación de lesiones causadas por *B. cinerea*. Más adelante, diversos autores (Bisen *et al.*, 2016; Woo *et al.*, 2007) confirmaron la capacidad de diferentes especies de *Trichoderma* para inducir resistencia sistémica en múltiples cultivos frente a distintos patógenos, consolidando su papel como un agente eficaz dentro del manejo biológico de enfermedades vegetales.

4.11.9 Aumento en el rendimiento y calidad de frutos

La capacidad de *Trichoderma* para incrementar el rendimiento en tomate se atribuye a una serie de mecanismos complejos y multifacéticos. Principalmente, actúan como agentes de biocontrol de enfermedades de raíz, protegiendo a la planta de patógenos fúngicos como *Fusarium*, *Pythium* y *Rhizoctonia* a través de micoparasitismo, competencia por nutrientes y espacio, y la producción de compuestos antifúngicos (Harman *et al.*, 2021). Al reducir el estrés biótico causado por estos patógenos, *Trichoderma* permite que la planta dirija una mayor cantidad de energía metabólica hacia el crecimiento vegetativo y reproductivo, lo que directamente se correlaciona con un mayor número de frutos o un incremento en su tamaño (González-Ramírez *et al.*, 2019). Además, diversas especies de *Trichoderma* son reconocidas por su capacidad de solubilizar nutrientes del suelo, como el fósforo y micronutrientes, haciéndolos más disponibles para la absorción radicular. Esto optimiza la nutrición de la planta, promoviendo un desarrollo más vigoroso y, en consecuencia, un mayor rendimiento productivo (Khan *et al.*, 2020).

Más allá del simple aumento en la cantidad, la aplicación de *Trichoderma* también impacta positivamente en la calidad de los frutos de tomate, un aspecto de vital importancia para el mercado y el consumidor final. Estudios recientes han demostrado que la interacción de *Trichoderma* con las raíces de tomate puede inducir la producción de compuestos volátiles y no volátiles en la planta, lo que a menudo se traduce en mejoras organolépticas. Se ha reportado un incremento en el contenido de sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix), que es un indicador clave del dulzor y sabor del tomate, así como en la acidez titulable y la concentración de vitamina C y licopeno, potentes antioxidantes responsables del color rojo característico y los beneficios para la salud (Ortiz-Castro *et al.*, 2017; Shahid *et al.*, 2021). Estas mejoras en la composición bioquímica no solo elevan el valor nutricional del fruto, sino que también pueden prolongar su vida útil poscosecha, un beneficio económico directo para productores y comercializadores. La estimulación de las defensas naturales de la planta por *Trichoderma* puede resultar en frutos más resistentes a daños físicos y a la proliferación de microorganismos deteriorantes, manteniendo su turgencia y apariencia por más tiempo.

4.12 Casos documentados en cultivos hortícolas

4.12.1 Evidencia en Cultivos Hortícolas Generales

Pimiento (*Capsicum annuum* L.): Se han reportado incrementos en el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la resistencia a enfermedades radiculares causadas por *Phytophthora capsici* tras la aplicación de *Trichoderma harzianum* (Woo *et al.*, 2018).

Pepino (*Cucumis sativus* L.): Estudios han documentado la mejora en el rendimiento, la absorción de nutrientes y la supresión de enfermedades como la marchitez por *Fusarium oxysporum* en pepino mediante la inoculación con *Trichoderma* (Harman *et al.*, 2021).

Lechuga (*Lactuca sativa* L.): La aplicación de *Trichoderma* ha resultado en un mayor crecimiento de biomasa y una protección contra patógenos como *Sclerotinia sclerotiorum* y *Rhizoctonia solani*, mejorando la sanidad y el vigor de las plántulas (Ortiz-Castro *et al.*, 2017).

4.12.2 Casos documentados en el cultivo de tomate

Aumento del Rendimiento y Vigor: Diversos estudios han reportado incrementos significativos en el rendimiento del fruto de tomate. Por ejemplo, Shahid *et al.* (2021) documentaron que la aplicación de *Trichoderma harzianum* llevó a un aumento en el número de frutos por planta y en el peso fresco total de la cosecha, lo cual se atribuyó a una mejor absorción de nutrientes y a la bioestimulación general del cultivo. En otro caso, González-Ramírez *et al.* (2019) observaron un incremento notable en la biomasa aérea y radicular, así como en el rendimiento de frutos, en plantas de tomate tratadas con *T. harzianum*, demostrando la eficacia de este bioinsumo en el vigor de la planta.

Mejora en la Calidad del Fruto: La influencia de *Trichoderma* en la calidad de los frutos de tomate también está bien documentada. Singh *et al.* (2021) destacaron que la aplicación de especies de *Trichoderma* puede resultar en frutos con mayores sólidos solubles totales (°Brix) y un contenido elevado de vitamina C y licopeno. Estas mejoras no solo elevan el valor nutricional del tomate, sino que también mejoran sus características organolépticas (sabor y color), y pueden prolongar su vida útil poscosecha, beneficios tangibles tanto para el productor como para el consumidor.

Control de Enfermedades Radiculares y de Follaje: La capacidad de *Trichoderma* como biocontrolador ha sido probada repetidamente en tomate. Saravanakumar *et al.* (2017) revisaron numerosos casos donde *Trichoderma* fue efectivo en la supresión de patógenos como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (marchitez vascular), *Rhizoctonia solani* y *Pythium spp.* (damping-off y pudriciones radiculares). La inoculación con *Trichoderma* ha mostrado reducir la incidencia y severidad de estas enfermedades, permitiendo que las plantas crezcan más sanas y productivas.

Inducción de Resistencia a Estrés: Se ha documentado que *Trichoderma* puede inducir resistencia en plantas de tomate frente a estreses abióticos. Por ejemplo, en condiciones de salinidad, plantas de tomate inoculadas con *Trichoderma* han mostrado una mayor tolerancia al estrés salino, manteniendo un mejor crecimiento y rendimiento en comparación con las no inoculadas (Sharma *et al.*, 2021).

4.13 Evidencia científica del uso de *Trichoderma* en tomate

La interacción de *Trichoderma* con las plantas de tomate es compleja y multifacética, manifestándose en diversos beneficios. Una de las vías más estudiadas es su capacidad para promover el crecimiento vegetal. Estudios han demostrado consistentemente que la inoculación de *Trichoderma* en el suelo o directamente en las semillas y raíces de plántulas de tomate conduce a un incremento significativo en parámetros de crecimiento. Por ejemplo, Contreras-Cornejo et al. (2016) documentaron cómo diversas cepas de *Trichoderma* pueden mejorar la arquitectura radical, aumentando la longitud y densidad de las raíces, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la absorción de agua y nutrientes. Esta optimización nutricional es clave, ya que una planta con un sistema radicular vigoroso está mejor equipada para soportar el estrés y canalizar recursos hacia la producción de frutos. La estimulación del crecimiento se atribuye, en parte, a la producción de fitohormonas o compuestos tipo auxinas por parte del hongo, que modulan el desarrollo vegetal (Sharma et al., 2021).

Otro pilar fundamental de la evidencia científica radica en el rol de *Trichoderma* como agente de biocontrol. Este hongo es un reconocido antagonista de numerosos patógenos fúngicos que afectan al tomate, como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (causante de la marchitez vascular), *Rhizoctonia solani* y especies de *Pythium* (responsables de damping-off y pudriciones de raíz). La capacidad de *Trichoderma* para micoparasitar a estos patógenos (enrollándose alrededor de sus hifas y degradándolas), competir por nutrientes y espacio, y producir metabolitos secundarios con actividad antifúngica (como gliotoxina o viridina) ha sido ampliamente demostrada (Harman et al., 2021). Un estudio de Lorito et al. (2019) sintetiza cómo estas interacciones reducen la incidencia y severidad de enfermedades radiculares, permitiendo que las plantas de tomate prosperen y alcancen su máximo potencial productivo sin la carga de infecciones devastadoras. Este efecto biocontrolador no solo protege la inversión del agricultor, sino que también ofrece una alternativa amigable con el ambiente al uso de fungicidas químicos.

Además de su impacto directo en el crecimiento y la protección, la evidencia también apunta a la capacidad de *Trichoderma* para inducir resistencia sistémica en las plantas de tomate. Al interactuar con las raíces, el hongo desencadena respuestas de defensa en toda la planta, preparándola para una mejor reacción ante futuros ataques de patógenos o plagas. Este fenómeno, conocido como Resistencia Sistémica Inducida (ISR, por sus siglas en inglés), es un mecanismo que fortalece las barreras naturales y las vías de señalización de defensa de la planta, haciéndola más resiliente frente a una amplia gama de estreses bióticos (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016).

4.14 Ensayos de campo e invernadero

El género *Trichoderma* comprende un grupo diverso de hongos filamentosos saprofitos, cosmopolitas en su distribución y abundantemente presentes en diversos ecosistemas, especialmente en el suelo y en asociación con raíces de plantas (Harman *et al.*, 2021). Su interés en la agricultura se ha catapultado en las últimas décadas debido a su reconocida capacidad para promover el crecimiento vegetal, actuar como agentes de control biológico contra patógenos de plantas y mejorar la resiliencia de los cultivos frente a estreses abióticos (Contreras-Cornejo *et al.*, 2022). Esta versatilidad convierte a *Trichoderma* en un pilar de las estrategias de agricultura sostenible y biopesticidas.

Trichoderma harzianum

T. harzianum es, quizás, la especie más emblemática y extensamente investigada dentro del género *Trichoderma*. Su popularidad radica en su excepcional capacidad para establecer interacciones beneficiosas con las plantas y su marcado efecto antagónico contra un amplio espectro de fitopatógenos fúngicos y oomicetos (Singh *et al.*, 2020). Los mecanismos de acción de *T. harzianum* son variados e incluyen el micoparasitismo, donde el hongo ataca directamente las hifas de los patógenos; la producción de enzimas líticas como quitinasas y glucanasas; la competencia por nutrientes y espacio; y la inducción de resistencia sistémica en la planta hospedera (ISR) (Sánchez-López *et al.*, 2018).

Además de su función como biocontrolador, *T. harzianum* es un eficaz promotor del crecimiento vegetal. Se ha demostrado que la inoculación con esta especie mejora la absorción de nutrientes, estimula el desarrollo radicular y foliar, y aumenta la tolerancia de las plantas a condiciones de estrés, como la salinidad o la sequía, al modular la expresión génica relacionada con la defensa y el crecimiento (Rosales-López *et al.*, 2021). Su adaptabilidad y robustez en diferentes ambientes lo hacen un candidato ideal para formulaciones comerciales de bioinsumos.

Trichoderma asperellum

T. asperellum es otra especie de gran relevancia agrícola, a menudo reconocida por su virulencia y eficiencia como agente de control biológico. Comparte muchos de los mecanismos de acción de *T. harzianum*, incluyendo el micoparasitismo y la producción de compuestos antifúngicos (Druzhinina *et al.*, 2011). Sin embargo, estudios recientes sugieren que *T. asperellum* puede ser particularmente efectivo contra ciertos patógenos de suelo y enfermedades de raíz debido a su capacidad para colonizar activamente el rizoplasma y rizósfera (Almeida *et al.*, 2019).

Esta especie también destaca por su capacidad para solubilizar fosfatos y otros nutrientes del suelo, haciéndolos más disponibles para las plantas, lo que contribuye directamente a la nutrición y vigor del cultivo. Su aplicación ha mostrado mejoras significativas en el rendimiento de diversos cultivos hortícolas y cereales bajo condiciones de campo, consolidándose como una alternativa valiosa en programas de manejo integrado de plagas y enfermedades (González-Estrada *et al.*, 2023).

Trichoderma viride

T. viride fue una de las primeras especies de *Trichoderma* en ser estudiada por sus propiedades antifúngicas, y sigue siendo una opción importante en la agricultura. Aunque quizás menos versátil que *T. harzianum* o *T. asperellum* en algunos aspectos, *T. viride* posee potentes capacidades micoparasíticas y produce metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana (Mukherjee *et al.*, 2018). Su acción se ha documentado contra patógenos como *Sclerotium rolfsii* y *Rhizoctonia solani*,

causantes de marchitamientos y pudriciones radiculares en un amplio rango de cultivos.

Al igual que otras especies de *Trichoderma*, *T. viride* también contribuye a la promoción del crecimiento vegetal, aunque su efecto puede variar según la cepa y el cultivo (Chowdhury *et al.*, 2019). La diversidad genética dentro de *T. viride* es considerable, lo que subraya la importancia de seleccionar cepas específicas con características deseables para aplicaciones agrícolas particulares. La investigación continua busca identificar y explotar cepas de *T. viride* con perfiles de acción mejorados.

4.15 Efectos en variables morfológicas y fisiológicas

4.15.1 Efectos en Variables Morfológicas

La presencia de *Trichoderma* en la rizosfera o como endófito en los tejidos vegetales induce cambios morfológicos distintivos que resultan en plantas más robustas y eficientes. Uno de los efectos más consistentemente reportados es la modificación de la arquitectura radical. Diversas especies de *Trichoderma* estimulan la elongación de la raíz principal y, de manera aún más prominente, el aumento en la densidad y ramificación de las raíces laterales y los pelos radiculares (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016). Esta proliferación del sistema radicular es de vital importancia, ya que una mayor superficie de contacto con el suelo facilita una absorción más eficiente de agua y nutrientes. La investigación ha sugerido que esta promoción del crecimiento radicular está mediada por la producción de compuestos tipo auxinas o la modulación de las vías de señalización de fitohormonas en la planta (Sharma *et al.*, 2021). Visualmente, esto se traduce en plantas con un anclaje más firme y una base sólida para el desarrollo aéreo.

A nivel de la parte aérea, si bien los efectos no son tan directos o dramáticos como en las raíces, *Trichoderma* contribuye a un mayor crecimiento vegetativo. Esto se manifiesta en un aumento de la altura de la planta, un mayor número de hojas y una expansión del área foliar. Estos cambios morfológicos en la parte aérea son una

consecuencia indirecta de una mejor nutrición y una menor exposición al estrés biótico y abiótico, lo que permite a la planta dedicar más energía a la fotosíntesis y al desarrollo de biomasa (Harman *et al.*, 2021). Una planta con mayor área foliar tiene una capacidad fotosintética incrementada, lo que es la base para una mayor producción de fotoasimilados y, en última instancia, un mayor rendimiento.

4.15.2 Efectos en Variables Fisiológicas

Mejora en la Absorción y Eficiencia de Nutrientes: Un efecto fisiológico clave es la optimización de la nutrición vegetal. *Trichoderma* puede solubilizar compuestos insolubles del suelo, como fosfatos y micronutrientes, haciéndolos disponibles para la planta (Khan *et al.*, 2020). Esto reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos y mejora la eficiencia con la que la planta utiliza los nutrientes disponibles. Además, la mejora en la arquitectura radicular ya mencionada es un factor fisiológico que potencia la capacidad de la planta para extraer y asimilar estos elementos.

Aumento de la Actividad Fotosintética: La mayor superficie foliar y la optimización nutricional, en conjunto, suelen conducir a un aumento en la tasa fotosintética neta de las hojas. Un estudio de Bhat *et al.* (2018) sugiere que *Trichoderma* puede influir en la eficiencia del uso de la luz y la fijación de carbono, lo que se traduce en una mayor producción de azúcares y otros metabolitos esenciales para el crecimiento y el desarrollo de frutos. Esto se ve reflejado en una coloración más intensa del follaje y un vigor general de la planta.

Inducción de Resistencia al Estrés (Biótico y Abiótico): *Trichoderma* es un inductor conocido de Resistencia Sistémica Inducida (ISR). A través de la activación de vías de señalización de defensa como las del ácido jasmónico (JA) y etileno (ET), la planta se vuelve más resistente a una amplia gama de patógenos y herbívoros (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016). Fisiológicamente, esto implica una mayor producción de compuestos defensivos como fitoalexinas o proteínas relacionadas con la patogénesis (PR proteins). Además, la presencia de *Trichoderma* puede mitigar el estrés abiótico, como la sequía, salinidad o el estrés por metales pesados, al modular la respuesta de la planta, por ejemplo, mejorando la actividad de enzimas antioxidantes y reduciendo el daño oxidativo (Sharma *et al.*, 2021). Esta capacidad de "entrenar" a la planta para enfrentar adversidades es una ventaja agronómica invaluable.

4.16 Influencia en parámetros de calidad del fruto

4.16.1 Atributos Organolépticos y Nutricionales

Sólidos Solubles Totales (°Brix) y Acidez. Uno de los parámetros de calidad más valorados es el contenido de sólidos solubles totales (SST o °Brix), que se correlaciona directamente con la dulzura del tomate. Estudios han demostrado que la inoculación con *Trichoderma* puede aumentar el contenido de SST en los frutos (Shahid *et al.*, 2021). Este incremento se debe a una mejor eficiencia fotosintética y a una movilización más efectiva de azúcares hacia los frutos. Complementariamente, se ha observado una modulación en la acidez titulable, un factor crucial para el equilibrio sabor-dulzura del tomate (Singh *et al.*, 2021). Un balance adecuado entre azúcares y ácidos orgánicos es esencial para un perfil de sabor agradable y complejo, lo que repercute directamente en la preferencia del consumidor.

Contenido de Vitamina C y Licopeno: Desde una perspectiva nutricional, *Trichoderma* ha mostrado potenciar la acumulación de compuestos bioactivos. El contenido de vitamina C (ácido ascórbico), un antioxidante esencial para la salud humana, a menudo se incrementa en frutos de tomate tratados con *Trichoderma* (Shahid *et al.*, 2021). De igual relevancia es el licopeno, el carotenoide responsable del color rojo característico del tomate y un potente antioxidante con reconocidos beneficios para la salud. La evidencia sugiere que la aplicación de *Trichoderma* puede favorecer una mayor acumulación de licopeno en los frutos, mejorando no solo su valor nutricional sino también su atractivo visual (Singh *et al.*, 2021).

4.16.2 Atributos físicos y vida útil poscosecha

Firmeza del Fruto: La firmeza es un atributo físico crítico que influye en la resistencia al daño mecánico durante la manipulación y el transporte, y en la aceptación del consumidor. Diversos estudios indican que la aplicación de *Trichoderma* puede resultar en frutos más firmes (Singh *et al.*, 2021). Esto podría estar relacionado con una mejor integridad de la pared celular o una menor tasa de ablandamiento

enzimático poscosecha, lo que confiere a los frutos una mayor capacidad para soportar los rigores de la cadena de suministro.

Vida Útil Poscosecha: La prolongación de la vida útil poscosecha es un objetivo primordial para reducir las pérdidas y el desperdicio de alimentos. Al inducir resistencia sistémica en la planta (ISR) y fortalecer sus defensas naturales, *Trichoderma* puede contribuir a que los frutos sean intrínsecamente más resistentes al ataque de patógenos poscosecha. Esta resistencia intrínseca, junto con una mayor firmeza, puede retrasar los procesos de deterioro, permitiendo que los frutos mantengan su calidad por un período más prolongado después de la cosecha (Ortiz-Castro *et al.*, 2017). Para el agricultor y los minoristas, esto se traduce en una reducción de mermas y una mayor flexibilidad en la comercialización.

4.17 Comparación con bioestimulantes microbianos y no microbianos

Otros Microorganismos Benéficos: *Trichoderma* comparte espacio con otros microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM), como bacterias rizobiales (*Rhizobium*, *Azotobacter*, *Bacillus*) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Mientras que las bacterias pueden sobresalir en la fijación de nitrógeno o la producción de fitohormonas, y los HMA en la expansión de la red de absorción de nutrientes (principalmente fósforo), *Trichoderma* se distingue por su doble función de promoción de crecimiento y biocontrol robusto (Woo *et al.*, 2018). Esta capacidad dual de defender y nutrir simultáneamente confiere a *Trichoderma* una ventaja estratégica. Por ejemplo, en escenarios con alta presión de patógenos de suelo, *Trichoderma* puede ofrecer una protección superior, mientras que, en condiciones de baja fertilidad, los HMA podrían ser complementarios o incluso superar su efecto en la captación de ciertos nutrientes. La combinación de *Trichoderma* con otros PGPM a menudo muestra efectos sinérgicos, maximizando los beneficios (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016), lo que sugiere que no son mutuamente excluyentes, sino potenciales aliados.

Bioestimulantes No Microbianos: Estos incluyen extractos de algas, ácidos húmicos y fúlvicos, y aminoácidos, que actúan mejorando la fisiología vegetal y la absorción de nutrientes. Si bien estos productos ofrecen beneficios, su mecanismo de acción es

generalmente exógeno y de corta duración, requiriendo aplicaciones repetidas. *Trichoderma*, al establecerse en la rizosfera o como endófito, forma una interacción más persistente y sistémica con la planta (Harman *et al.*, 2021). Su acción biocontroladora, la inducción de resistencia sistémica y su capacidad para solubilizar nutrientes son ventajas que los bioestimulantes microbianos no poseen directamente. Para el agricultor, esto puede significar una inversión a largo plazo más eficiente y menos dependencia de aplicaciones externas.

4.18 Comparación con tratamientos convencionales (Agroquímicos)

Fungicidas Químicos: Los fungicidas sintéticos han sido la herramienta principal para el control de enfermedades. Si bien ofrecen una acción rápida y a menudo muy eficaz, su uso continuado conlleva riesgos significativos: desarrollo de resistencia en patógenos, impacto negativo en la microflora benéfica del suelo, residuos tóxicos en el fruto y el ambiente, y riesgos para la salud humana (Saravanakumar *et al.*, 2017). *Trichoderma* ofrece una alternativa biológica con múltiples mecanismos de acción (micoparasitismo, competencia, antibiosis, ISR), lo que reduce la probabilidad de desarrollo de resistencia en los patógenos. Además, es un producto biodegradable, no tóxico y compatible con una agricultura de bajo impacto, siendo un pilar para la producción orgánica y la reducción de la huella química en el campo.

Fertilizantes Químicos: Los fertilizantes inorgánicos son esenciales para la nutrición de las plantas. Sin embargo, su uso excesivo o ineficiente puede llevar a la lixiviación de nutrientes, contaminación de aguas y suelos, y a una dependencia energética en su producción. *Trichoderma* mejora la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes (principalmente fósforo, hierro y otros micronutrientes) al solubilizarlos y hacerlos disponibles para la planta (Khan *et al.*, 2020). Esto permite reducir las dosis de fertilizantes químicos o maximizar la eficiencia de los aplicados, lo que se traduce en ahorro de costos para el agricultor y una menor carga ambiental.

4.19 Perspectivas del uso de *Trichoderma* en la agricultura sostenible

4.19.1 Hacia una agricultura resiliente y ecológica

La capacidad multifuncional de *Trichoderma* lo convierte en un pilar para la resiliencia agrícola. Su rol como agente de biocontrol permite la reducción significativa de fungicidas sintéticos, mitigando la contaminación de suelos y aguas, y protegiendo la biodiversidad microbiana benéfica (Woo *et al.*, 2018). Esta transición hacia un menor uso de químicos no solo beneficia al ambiente, sino que también promueve la salud de los ecosistemas agrícolas a largo plazo. Al proteger los cultivos de patógenos y mejorar la absorción de nutrientes, *Trichoderma* contribuye a la estabilidad de los rendimientos, incluso frente a condiciones de estrés abiótico como sequía o salinidad (Sharma *et al.*, 2021). En un mundo con un clima cada vez más errático, esta resiliencia es vital para la seguridad alimentaria. Las perspectivas apuntan a una integración cada vez mayor de *Trichoderma* en sistemas de agricultura orgánica y biodinámica, donde su función ecológica es fundamental para el equilibrio del agroecosistema.

4.19.2 Optimización de recursos y eficiencia agronómica

La eficiencia en el uso de los recursos es una piedra angular de la sostenibilidad. *Trichoderma* mejora la eficiencia en la absorción y movilización de nutrientes como fósforo, hierro y nitrógeno, al solubilizarlos y hacerlos más biodisponibles (Khan *et al.*, 2020). Esto abre la puerta a una reducción en la aplicación de fertilizantes químicos, disminuyendo los costos de producción para el agricultor y minimizando la contaminación por lixiviación. Futuras investigaciones podrían enfocarse en el desarrollo de cepas de *Trichoderma* aún más eficientes en la solubilización de nutrientes específicos o en la promoción del ciclo de nutrientes en suelos degradados. La mejora en la arquitectura radicular y la absorción hídrica también sugieren un papel potencial de *Trichoderma* en la eficiencia del uso del agua, un recurso cada vez más escaso en muchas regiones agrícolas.

4.19.3 Innovación y desarrollo tecnológico

Selección y Mejora de Cepas: La genómica y la edición génica permitirán la identificación y el desarrollo de cepas de *Trichoderma* con características mejoradas y más específicas para diferentes cultivos, tipos de suelo y condiciones ambientales (Harman *et al.*, 2021). Se buscarán cepas con mayor eficacia de biocontrol, mayor capacidad de promoción de crecimiento y mayor tolerancia a condiciones adversas.

Formulaciones Avanzadas: Se espera el desarrollo de formulaciones más estables, de mayor vida útil y más fáciles de aplicar en campo (Ortiz-Castro *et al.*, 2017). Esto incluirá tecnologías de encapsulación y microencapsulación que protejan al hongo y aseguren su viabilidad y actividad óptima en el suelo.

Manejo Integrado y Sinergias: *Trichoderma* será una pieza clave en estrategias de Manejo Integrado de Plagas y Nutrición (MIP/MIN), donde se combine de manera sinérgica con otros agentes de biocontrol (bacterias, virus, insectos benéficos), bioestimulantes y prácticas agronómicas (rotación de cultivos, labranza de conservación). Esta integración holística maximizará los beneficios y reducirá la dependencia de insumos externos.

4.20 Ventajas frente a insumos sintéticos

4.20.1 Sostenibilidad ambiental y salud del ecosistema

La ventaja más prominente de *Trichoderma* sobre los insumos sintéticos radica en su perfil de sostenibilidad ambiental. Los fungicidas sintéticos a menudo carecen de especificidad, impactando negativamente no solo al patógeno objetivo, sino también a la microflora benéfica del suelo, que es esencial para la fertilidad y la salud del ecosistema (Saravanakumar *et al.*, 2017). Además, pueden generar residuos persistentes en el suelo y el agua, y acumularse en los frutos, planteando preocupaciones de contaminación ambiental y seguridad alimentaria. *Trichoderma*, por el contrario, es un organismo naturalmente presente en el suelo, biodegradable y no tóxico para la fauna, la microflora no objetivo y el ser humano (Harman *et al.*, 2021). Su acción biocontroladora es a menudo específica o altamente selectiva, permitiendo

que las interacciones ecológicas beneficiosas en el suelo se mantengan intactas, fomentando un agroecosistema más equilibrado y resiliente.

En cuanto a los fertilizantes químicos, su fabricación es energéticamente intensiva y su uso excesivo puede provocar la lixiviación de nitratos y fosfatos, causando eutrofización de cuerpos de agua y contaminación del suelo (Khan *et al.*, 2020). *Trichoderma*, al mejorar la eficiencia en la absorción y movilización de nutrientes por la planta y al solubilizar elementos inorgánicos en el suelo, permite reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos. Esto no solo disminuye la huella de carbono asociada a la producción y transporte de fertilizantes, sino que también previene la contaminación ambiental y fomenta un ciclo de nutrientes más natural y sostenible.

4.20.2 Eficiencia agronómica y resiliencia del cultivo

Más allá de lo ambiental, *Trichoderma* ofrece ventajas agronómicas que superan la acción unitaria de los sintéticos. Los plaguicidas suelen ofrecer una solución temporal a un problema específico, pero pueden conducir al desarrollo de resistencia en los patógenos, obligando a un ciclo constante de búsqueda de nuevos químicos (Woo *et al.*, 2018). *Trichoderma* actúa a través de múltiples mecanismos de acción (micoparasitismo, competencia, antibiosis, inducción de resistencia sistémica), lo que dificulta el desarrollo de resistencia en los patógenos y proporciona una protección más robusta y duradera. La inducción de resistencia sistémica (ISR) es una ventaja clave, ya que activa las defensas naturales de la planta, haciéndola inherentemente más fuerte y menos susceptible a una gama más amplia de estreses bióticos y abióticos, una capacidad que los químicos no pueden replicar (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016).

En términos de nutrición, mientras los fertilizantes sintéticos proporcionan nutrientes de forma directa y a veces ineficiente, *Trichoderma* optimiza la fisiología de la planta para una mejor absorción y utilización de los nutrientes ya presentes en el suelo, e incluso puede hacer disponibles nutrientes que estaban "bloqueados" (Sharma *et al.*, 2021).

4.20.3 Seguridad alimentaria y beneficios para la salud humana

Finalmente, la ventaja de *Trichoderma* se extiende a la seguridad alimentaria y la salud pública. La reducción en el uso de plaguicidas sintéticos disminuye la presencia de residuos químicos en los alimentos, lo que resulta en un tomate más seguro y saludable para el consumo (Saravanakumar *et al.*, 2017). Para los agricultores y trabajadores del campo, la manipulación de insumos biológicos como *Trichoderma* representa un menor riesgo para su salud en comparación con la exposición a productos químicos potencialmente tóxicos. Esta preocupación humanista, a menudo eclipsada por la búsqueda de la máxima producción, es fundamental para una agricultura verdaderamente sostenible y ética.

4.21 Aplicación en programas de manejo integrado del cultivo

4.21.1 *Trichoderma* como componente central del manejo integrado de plagas (MIP)

Control Biológico Fundacional: La aplicación temprana de *Trichoderma* (ej. en semillero, trasplante o directamente en el suelo) establece una población benéfica en la rizosfera que actúa como primera línea de defensa. Esta colonización anticipada permite al hongo competir con patógenos desde las etapas iniciales del cultivo, micoparasitarlos o suprimir su desarrollo mediante la producción de metabolitos antifúngicos (Harman *et al.*, 2021). Su uso es particularmente eficaz contra enfermedades como la marchitez por *Fusarium*, el damping-off (*Pythium*, *Rhizoctonia*) y la podredumbre de raíz (Saravanakumar *et al.*, 2017).

Inducción de Resistencia Sistémica (ISR): Un aspecto crucial de la integración de *Trichoderma* en MIP es su capacidad para inducir Resistencia Sistémica Inducida (ISR) en la planta. Al activar los mecanismos de defensa naturales del tomate, *Trichoderma* prepara a la planta para enfrentar futuros ataques de una gama más amplia de patógenos e incluso plagas. Esto permite una reducción en la frecuencia o dosis de otros plaguicidas, ya que la planta es intrínsecamente más resistente (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016).

Complemento a Otros Métodos: *Trichoderma* no actúa solo. En MIP, se combina con otras tácticas como el uso de variedades resistentes, prácticas culturales (rotación de cultivos, solarización, saneamiento), control biológico con otros agentes (ej. insectos benéficos, bacterias entomopatógenas) y, si es necesario, la aplicación puntual de fungicidas de bajo impacto y rotación de modos de acción. Esta sinergia maximiza la protección y minimiza los riesgos de desarrollo de resistencia, ofreciendo una estrategia de defensa multicapa para el tomate (Woo *et al.*, 2018).

4.21.2 *Trichoderma* como Bioestimulante en el Manejo Integrado de Nutrición (MIN)

Mobilización y Disponibilidad de Nutrientes: *Trichoderma* mejora la absorción de nutrientes, especialmente fósforo y micronutrientes, al solubilizar compuestos insolubles del suelo y facilitar su asimilación por las raíces (Khan *et al.*, 2020). Esto permite al agricultor optimizar los planes de fertilización, reduciendo las dosis de fertilizantes químicos sintéticos sin comprometer el rendimiento del cultivo. La eficiencia en el uso de nutrientes es un pilar de la sostenibilidad económica y ambiental.

Promoción del Crecimiento: Al mejorar la arquitectura radicular y la fisiología de la planta, *Trichoderma* contribuye directamente a un desarrollo más robusto del tomate. Esta bioestimulación complementa las estrategias de fertilización, asegurando que los nutrientes aplicados sean utilizados de manera más efectiva para la producción de biomasa y frutos de alta calidad (Sharma *et al.*, 2021).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del área de estudio

El presente trabajo se realizó durante el ciclo primavera - verano del año 2025, en el invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizado al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México. El sitio experimental donde se encuentra en las coordenadas geográficas 25°21'24" N y 101°02'06" O. La dirección física es Calzada Antonio Narro No. 1923, Colonia Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

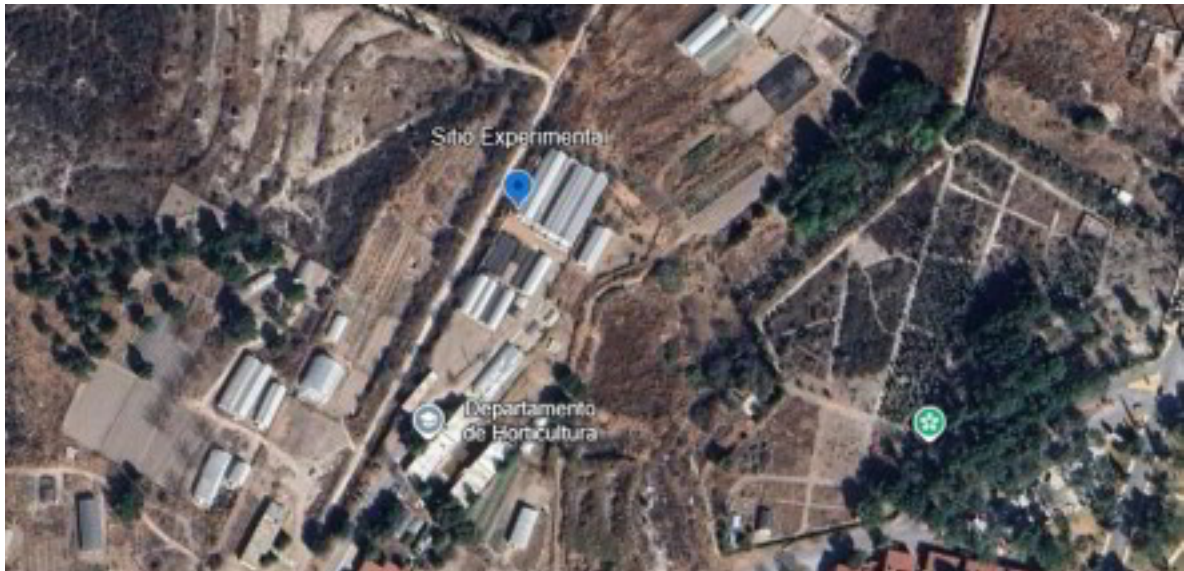


Figura 1. Vista satelital del sitio experimental en la UAAAN. Fuente: Imagen de Google Earth (2025). imagen capturada el 25 de septiembre de 2025.

5.2 Material Vegetal

Se estableció un cultivo de tomate saladette (*Solanum lycopersicum* L.) variedad el CID (casa comercial HARRIS MORAN) a dos tallos, de hábito indeterminado, seleccionada por su alto potencial productivo y adaptabilidad a condiciones de invernadero.

Durante el desarrollo del cultivo se efectuaron labores de poda apical y eliminación de brotes laterales para mantener la estructura bifurcada, garantizando uniformidad entre los tratamientos. Todas las plantas recibieron riegos y fertilizaciones de acuerdo con las necesidades fisiológicas del cultivo y las condiciones ambientales del invernadero.

5.3 Material fúngico

Las cepas de *T. asperellum* fueron proporcionadas por el INIFAP Campus Experimental Valle del Guadiana. Las cuales fueron aisladas de suelos de esa región, en el estado de Durango

5.3.1 Resiembra de *Trichoderma asperellum*

Se obtuvieron cultivos de *T. asperellum* de cajas Petri con 10 días de crecimiento, a partir de las cuales se extrajeron discos miceliales de aproximadamente 5 mm de diámetro. Estos discos se transfirieron a nuevas cajas Petri que contenían medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA), preparado previamente bajo condiciones estériles. Posteriormente, las cajas inoculadas se incubaron a una temperatura de 28 °C durante siete días, con el propósito de favorecer el desarrollo micelial y obtener colonias maduras y viables de *T. asperellum*, que fueron utilizadas como fuente de inóculo en las etapas experimentales posteriores.

5.3.2 Reproducción de *Trichoderma asperellum* en arroz

La reproducción de *T. asperellum* se realizó utilizando arroz como sustrato sólido por su alto contenido de almidón, favorable para el crecimiento y esporulación del hongo. Se pesaron 300 g de arroz con *Trichoderma* desarrollado, se lavaron y remojaron por 4 a 6 horas, ajustando la humedad al 40–50 %. El sustrato se esterilizó a 121 °C durante 15 minutos en una autoclave marca Felisa. Una vez enfriado, se inoculó con 5 a 10 discos miceliales (5 mm) provenientes de cultivos activos en medio PDA.

Las unidades inoculadas se incubaron a 25–28 °C por 7 a 10 días, hasta observar una completa colonización del arroz y la formación de conidios de color verde. El material se almacenó hasta su uso en los bioensayos.

5.3.3 Preparación del inóculo

La aplicación de *T. asperellum* se llevó a cabo directamente en el invernadero. Para la preparación inicial, se utilizaron 300 g de arroz, los cuales se colocaron en una cubeta con agua y se agitaron vigorosamente con el fin de desprender y dispersar las esporas. Posteriormente, la mezcla se cernió sobre una malla, permitiendo la separación del material sólido y obteniendo así una suspensión homogénea de esporas, que fue diluida con agua para favorecer una mezcla uniforme.

5.4 Bioensayo *in situ*

Posterior a la limpieza del invernadero, se llenaron maceta y bolsa con un sustrato compuesto por lombricomposta, tierra, perlita y peat moss en proporción 20:60:10:10, con el propósito de obtener un medio rico en materia orgánica que favoreciera el desarrollo de *Trichoderma asperellum* y del cultivo. Las plántulas se trasplantaron a los 25 días después de la siembra, cuando presentaban una altura promedio de 15 a 20 cm, con raíces bien desarrolladas y follaje vigoroso. El experimento se estableció en seis surcos (tres con macetas y tres con bolsas) bajo un diseño completamente al azar (DCA) con tres tratamientos y un testigo absoluto (Figura 2) con 6 repeticiones correspondiendo a las unidades experimentales, asegurando una distribución equitativa de los tratamientos. El manejo agronómico del cultivo (riego, poda, tutorado y control fitosanitario) se realizó conforme a las prácticas agrícolas tradicionales de la región, manteniendo condiciones homogéneas para todas las unidades experimentales.

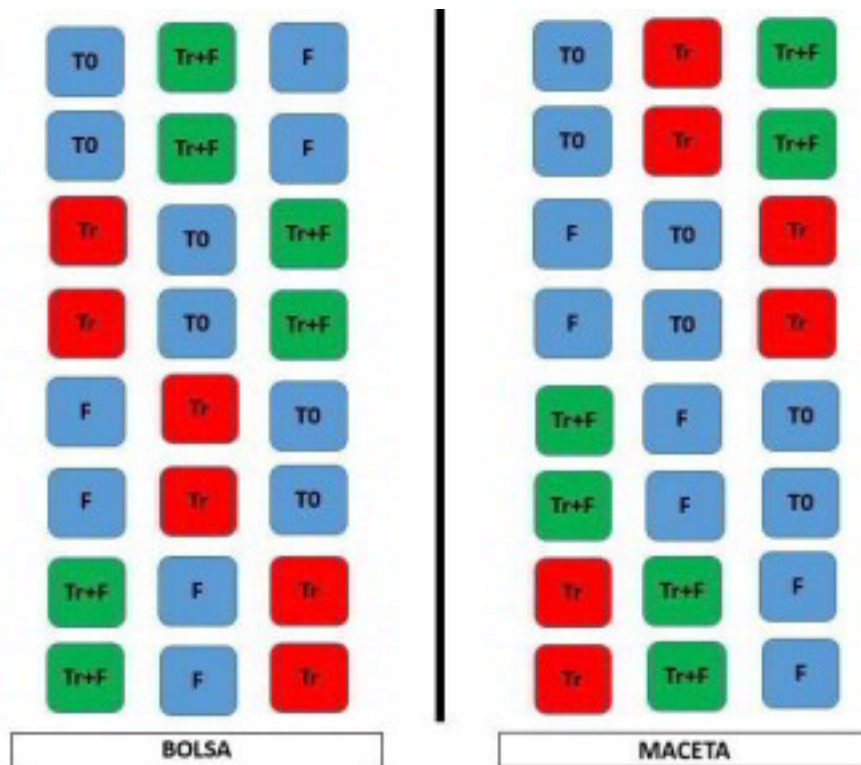


Figura 2. Establecimiento del experimento y tratamientos aplicados: Tr: aplicación de *Trichoderma*; F: aplicación de fertilizante; Tr+F: *Trichoderma* mas fertilizante y T0: testigo absoluto (sin fertilización ni *Trichoderma*).

5.4.1 Inoculación de plantas con *Trichoderma asperellum*

A partir de la preparación del inóculo se aplicó un volumen de 50 ml de la suspensión de esporas de *T. asperellum* en un total de 48 plantas, distribuidas en bolsas y macetas. Posteriormente, se procedió a la aplicación de los 50 ml de *T. asperellum* a cada una de las unidades experimentales en los tratamientos establecidos dentro del experimento, asegurando la uniformidad en la dosis y la correcta distribución del inoculante en las unidades experimentales.

5.4.2 Aplicación de fertilizantes minerales

El manejo nutricional en cultivos bajo ambiente protegido como el desarrollo de *Solanum lycopersicum* L. variedad Saladette el Cid en invernadero requiere una estrategia de fertilización precisa y alineada con los momentos fenológicos de la planta. En este contexto, la utilización de una solución nutritiva tipo Steiner modificada permite suministrar todos los nutrientes esenciales en formas disponibles, garantizando el crecimiento vegetativo, floración, cuaja y llenado de fruto (Kroggel & Kubota, 2018).

La justificación técnica para emplear una solución de este tipo radica en que el sustrato o medio de cultivo en sistemas protegidos no siempre proporciona nutrición de manera natural, por lo que el aporte iónico externo debe cumplir criterios de concentración, balance catión-anión, pH y CE adecuados. Kroggel y Kubota (2018) señalan que “una solución nutritiva bien formulada es uno de los componentes más importantes para establecer y mantener un cultivo exitoso de tomate en invernadero” (p. 3). Entre sus recomendaciones se encuentra ajustar la CE y el pH para garantizar disponibilidad de nutrientes: valores típicos oscilan entre 1.8 y 2.5 dS m⁻¹ para tomate bajo invernadero, con pH entre 5.5 y 6.5 (Phytoplant Review, 2020).

5.4.3 Cosecha

La cosecha de los frutos de tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) se realizó de manera manual cuando estos alcanzaron un estado de madurez fisiológica uniforme, caracterizado por el cambio de color del exocarpo de verde a rojo intenso y la firmeza típica del fruto comercial (Pineda *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2023). Esta actividad se realizó dependiendo al tiempo de maduración en avcda racimo en este experimento se consideró la maduración.

5.5 variables

5.5.1 Agronómicas

Longitud del tallo (cm). La longitud del tallo principal de *Solanum lycopersicum* L. variedad el Cid fue medida utilizando una cinta métrica graduada en centímetros, con capacidad de 1 metro (100 cm). Las mediciones se realizaron desde la base del tallo, a nivel del cuello de la planta, hasta el ápice de crecimiento, siguiendo metodologías empleadas en evaluación agronómica de hortalizas bajo condiciones de invernadero (Pérez & López, 2018). Los registros se tomaron en centímetros (cm) debido a que esta unidad es recomendada para estudios de biometría vegetal (Santos *et al.*, 2017), permitiendo analizar el efecto de tratamientos biológicos sobre el desarrollo morfológico del cultivo.

Diámetro del tallo (mm). El diámetro del tallo se midió en cada una de las plantas de *Solanum lycopersicum* L. variedad el Cid utilizando un vernier digital de precisión ± 0.01 mm, instrumento recomendado en estudios agronómicos para la evaluación del crecimiento estructural en cultivos hortícolas (Ramírez *et al.*, 2019). Las mediciones se realizaron a los 10 cm de altura sobre la base del tallo, en la zona de mayor homogeneidad estructural, con el fin de evitar variaciones generadas por entrenudos o ramificaciones (Hernández & Valdez, 2020). Los datos obtenidos fueron registrados en milímetros (mm) para su posterior análisis estadístico.

Número de entrenudos. Por planta se evaluó con la finalidad de determinar el efecto de los tratamientos sobre el crecimiento vegetativo y la emisión de nudos a lo largo del tallo principal. La medición se realizó de manera directa y visual, contabilizando manualmente cada uno de los entrenudos presentes desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento de la planta.

5.5.2 Calidad del fruto

Sólidos solubles totales (°Brix). El contenido de sólidos solubles totales en fruto se determinó utilizando un refractómetro digital portátil, calibrado previamente con agua destilada a 0 °Brix para garantizar precisión en las mediciones (Martínez *et al.*, 2018). Para el análisis, se tomó una muestra homogénea de jugo proveniente de frutos maduros, previamente triturados y filtrados para eliminar impurezas. Posteriormente, se depositó una gota del extracto sobre el prisma del refractómetro, realizando la lectura en grados Brix (°Brix), unidad que representa el contenido de azúcares solubles presentes en el fruto, principalmente sacarosa, glucosa y fructosa (Soto & Delgado, 2020). Esta variable constituye un indicador de calidad organoléptica y madurez fisiológica, además de relacionarse directamente con el sabor, densidad energética y aceptación comercial del fruto (Rojas *et al.*, 2022).

Peso del fruto (g). El peso del fruto se determinó utilizando una báscula digital de precisión ± 0.01 g, previamente calibrada, con el fin de garantizar la confiabilidad de las mediciones biométricas (Hernández *et al.*, 2019). Los frutos fueron cosechados en estado de madurez fisiológica comercial y posteriormente pesados individualmente. Las mediciones se realizaron inmediatamente después de la cosecha para evitar pérdidas de peso por deshidratación (Pineda & Morales, 2020). El registro del peso fresco por fruto se realizó en gramos (g), dato que constituye un indicador directo del rendimiento y tamaño del fruto (Cruz *et al.*, 2021).

El diámetro polar (mm). El fruto se determinó mediante el uso de un vernier digital con una precisión de ± 0.01 mm, siguiendo la metodología descrita por López *et al.* (2022). La medición se realizó tomando la distancia desde el extremo apical hasta la zona peduncular del fruto, lo que representa el eje longitudinal o eje mayor (Pineda *et al.*, 2021). Se seleccionaron tres frutos maduros por planta en cada repetición experimental, y en cada uno se efectuaron tres lecturas para obtener el promedio representativo del tratamiento. Esta variable morfométrica permite evaluar el desarrollo y la uniformidad del fruto, así como inferir su respuesta a tratamientos agronómicos o

bioestimulantes aplicados durante el ciclo de cultivo (Martínez *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

El diámetro ecuatorial (mm). El fruto se midió utilizando un vernier digital con una precisión de ± 0.01 mm, de acuerdo con la metodología propuesta por López *et al.* (2022). La medición se realizó tomando la distancia máxima perpendicular al eje polar del fruto, es decir, en la zona de mayor anchura o sección media (Pineda *et al.*, 2021). Para cada repetición experimental se seleccionaron tres frutos maduros por planta, efectuándose tres lecturas por fruto para obtener el valor promedio representativo. Esta variable permite estimar el desarrollo transversal del fruto y, junto con el diámetro polar, contribuye a caracterizar la forma y uniformidad, indicadores importantes de la calidad comercial y del efecto de los tratamientos agronómicos aplicados (Martínez *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

5.5.3 Análisis estadístico

Se comprobaron los supuestos de normalidad de los datos a través de la prueba de Shapiro Wilk. Todos los datos fueron analizados a través del programa SAS versión 9.0 (SAS,1987). Las medias fueron comparadas mediante la prueba Tukey ($p < 0.05$); para el análisis estadístico de datos se realizaron ANOVAS.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Longitud del tallo en bolsa y maceta

La variable longitud del tallo se presenta en el Cuadro 3. Evaluada en el cultivo de tomate bajo distintos tratamientos, medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo y establecidas en bolsa y maceta. La longitud del tallo presentó un incremento progresivo conforme avanzaron las fechas de evaluación en ambos sistemas de producción (bolsa y maceta). En bolsa los cuatro tratamientos (Tr+F, F, Tr y T0) mostraron valores estadísticamente iguales Tukey ($P < 0.05$) durante las fechas de evaluación. En maceta durante la fecha 1 se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos, donde Tr+F presentó el mayor número de entrenudos mientras que Tr y T0 registraron los valores más bajos. En la fecha 2 no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Finalmente, en la fecha 3 se presentaron diferencias significativas donde los tratamientos con fertilización (Tr+F y F) mostraron los valores más altos mientras que Tr y T0 presentaron los valores más bajos.

Los resultados obtenidos para la longitud del tallo (Cuadro3) evidencian un incremento continuo a lo largo del ciclo del cultivo en ambos sistemas de producción, lo cual concuerda con el patrón fisiológico normal del crecimiento vegetativo del tomate, donde la elongación del tallo está asociada al aumento progresivo de la actividad meristemática y la disponibilidad de fotoasimilados (Heuvelink, 2018).

En bolsa la ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos durante las tres fechas de evaluación (Tukey, $P \leq 0.05$) indica que todos los tratamientos mostraron un comportamiento similar, independientemente de la aplicación de *Trichoderma asperellum* o del fertilizante. Este comportamiento puede atribuirse a que el mayor volumen de sustrato en bolsa permitió una mejor retención de agua y nutrientes, favoreciendo un crecimiento uniforme del tallo y reduciendo la expresión del efecto diferencial de los tratamientos. Resultados similares han sido reportados por Castellanos et al. (2019), quienes mencionan que en sustratos con adecuada nutrición y humedad el crecimiento del tomate tiende a homogenizarse, aun bajo diferentes esquemas de fertilización.

En maceta sí se detectaron diferencias significativas (Cuadro 3) en la fecha 1 y en la fecha 3, donde los tratamientos Tr+F y F presentaron las mayores longitudes del tallo, mientras que Tr y T0 mostraron los valores más bajos. Este comportamiento sugiere que, bajo condiciones de mayor restricción radicular, como ocurre en maceta, la disponibilidad inmediata de nutrientes minerales resulta determinante para el crecimiento inicial y final del tallo. La respuesta positiva de los tratamientos fertilizados concuerda con lo reportado por Hochmuth y Hochmuth (2016), quienes señalan que el nitrógeno es el principal nutriente que regula la elongación celular y el crecimiento del tallo en tomate.

Cuadro 3. Longitud del tallo en planta de tomate con bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	2.36875	a	2.5425	a	2.70500	a
	F	2.41250	a	2.6250	a	2.75375	a
	Tr	2.34750	a	2.6875	a	3.21250	a
	T0	2.39000	a	2.8825	a	2.93250	a
MACETA	Tr+F	2.2375	a	2.60875	a	2.86375	a
	F	2.0900	a	2.39500	a	2.97375	a
	Tr	1.8975	b	2.20750	ab	2.72500	ab
	T0	1.7875	b	1.925	b	2.33250	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

El tratamiento con *Trichoderma asperellum* sin fertilización (Tr) no logró igualar el crecimiento observado con fertilización química, lo que indica que, si bien este hongo promueve el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes, su efecto es más notable cuando existe suficiente disponibilidad nutrimental en el sustrato. Al respecto, Harman *et al.* (2012) señalan que *Trichoderma* actúa principalmente como bioestimulante y facilitador de la absorción, pero no sustituye por completo el suministro directo de macronutrientes esenciales. Asimismo, el comportamiento inferior del testigo absoluto (T0) en maceta confirma que la limitación nutrimental afecta directamente la

elongación del tallo, reduciendo el área fotosintética y, por ende, el potencial productivo de la planta. Este efecto ha sido ampliamente respaldado en cultivos en contenedor, donde la falta de fertilización reduce significativamente el crecimiento vegetativo (Gruda, 2019).

En la fecha 3, el mejor desempeño de Tr+F y F sugiere que la fertilización sostuvo el crecimiento del tallo hasta etapas avanzadas del cultivo, mientras que los tratamientos sin fertilización presentaron un crecimiento restringido. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Dorais *et al.* (2017), quienes establecen que una adecuada nutrición durante las fases de crecimiento activo del tomate es determinante para mantener tasas elevadas de elongación del tallo.

En términos generales, los resultados indican que la fertilización convencional fue el principal factor que influyó en la longitud del tallo en maceta, mientras que el efecto de *Trichoderma asperellum* fue complementario, pero no dominante. En bolsa, las condiciones más favorables del sustrato atenuaron las diferencias entre tratamientos. Esto confirma que la respuesta de los bioinsumos está fuertemente condicionada por el sistema de cultivo y la disponibilidad nutrimental del sustrato.

6.2 Diámetro del tallo en bolsa y maceta

La variable diámetro de tallo se presenta en el Cuadro 4. evaluada en el cultivo de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo establecidos en bolsas y en maceta. En bolsa no se presentaron diferencias estadísticas significativas (Tukey $P < 0.05$) entre tratamientos en ninguna de las tres fechas, lo que indica una respuesta similar del cultivo independientemente del tratamiento aplicado. En maceta durante la Fecha 1 tampoco se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 2 sí se observaron diferencias estadísticas, donde el tratamiento Tr+F presentó el mayor diámetro de planta en contraste con el testigo (T0), que mostró el valor más bajo. Para la Fecha 3, se mantuvieron diferencias significativas, resaltando nuevamente el mayor diámetro en el tratamiento Tr+F, mientras que el tratamiento T0 presentó el menor desarrollo.

El diámetro del tallo es un indicador morfológico clave del vigor vegetativo del tomate, estrechamente relacionado con la capacidad de conducción de agua, nutrientes y fotoasimilados, así como con la resistencia mecánica de la planta (Wien, 1997; Venkateswarlu *et al.*, 2021). En el presente estudio, el comportamiento del diámetro del tallo mostró respuestas contrastantes entre los sistemas de cultivo en bolsa y en maceta.

Cuadro 4. Diámetro del tallo en planta de tomate en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	10.8300	a	12.01500	a	13.38875	a
	F	10.9075	a	12.41375	a	13.00000	a
	Tr+A	10.7125	a	11.93500	a	13.26250	a
	T0	11.0100	a	11.72250	a	12.59000	a
MACETA	Tr+F	10.07500	a	11.64750	a	12.62875	a
	F	9.55875	a	10.40875	bc	11.56625	ab
	Tr+A	9.47750	a	11.25000	ab	11.94750	ab
	T0	8.73500	a	9.51000	c	10.51750	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En bolsa no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos durante ninguna de las tres fechas de evaluación ($P \leq 0.05$). Este comportamiento sugiere que el volumen de sustrato, junto con una disponibilidad nutrimental más estable, permitió un desarrollo uniforme del tallo independientemente de la aplicación de *Trichoderma* o fertilización. Este tipo de respuesta ha sido previamente reportado en sistemas con suficiente reserva de nutrientes, donde las plantas alcanzan su potencial morfológico sin manifestar efectos marcados por bioestimulantes (López *et al.*, 2022; Cruz *et al.*, 2021).

En maceta sí se observó un efecto diferencial de los tratamientos a partir de la Fecha 2. El tratamiento Tr+F presentó consistentemente los mayores valores de diámetro del

tallos, mientras que el testigo absoluto (T0) registró los valores más bajos, manteniéndose estas diferencias hasta la Fecha 3. Este comportamiento evidencia que, bajo condiciones de mayor restricción radicular y nutricional propias de la maceta, la combinación de fertilización química con *Trichoderma* favoreció significativamente el crecimiento del tallo. El efecto positivo de Tr+F puede atribuirse a la acción sinérgica entre el aporte directo de nutrientes y la capacidad de *Trichoderma* para mejorar la absorción de N, P, K y micronutrientes mediante la solubilización de fosfatos y la estimulación del sistema radical (Hoyos-Carvajal *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2020). Asimismo, este hongo promueve la producción de fitohormonas como auxinas y giberelinas, las cuales favorecen la división y elongación celular del tallo, incrementando su diámetro (Sharma *et al.*, 2021).

Por otro lado, el comportamiento inferior del testigo absoluto (T0) confirma que la carencia nutricional en maceta limita de forma directa el engrosamiento del tallo, reduciendo la capacidad estructural y el potencial de transporte interno de la planta. Estudios previos han demostrado que la deficiencia de nitrógeno, calcio y potasio impacta negativamente el diámetro del tallo y la acumulación de biomasa en tomate (Marschner, 2012; Lozada-Ramírez *et al.*, 2017). El tratamiento Tr+A, aunque mostró valores intermedios, no logró igualar completamente el desempeño de Tr+F, lo que indica que, si bien *Trichoderma* tiene un efecto bioestimulante, su acción es más eficiente cuando existe una fuente disponible de nutrientes minerales. Resultados similares han sido reportados por Shahid *et al.* (2021) y Singh *et al.* (2020), quienes señalaron que *Trichoderma* potencia significativamente el crecimiento del tallo cuando se combina con un manejo nutricional adecuado.

En términos fisiológicos, un mayor diámetro del tallo se traduce en una mayor capacidad para sostener el crecimiento vegetativo y reproductivo, así como una mejor distribución de fotoasimilados hacia órganos reproductivos, favoreciendo indirectamente el rendimiento del cultivo (Rojas *et al.*, 2022; López-García *et al.*, 2021). Por tanto, los resultados del presente estudio evidencian que el tratamiento Tr+F constituye una estrategia agrónomicamente viable para fortalecer el desarrollo

estructural del tomate bajo sistemas de producción con limitación de sustrato como la maceta.

6.3 Entrenudos de planta en bolsa y maceta

La variable entrenudos de la planta se presenta en el Cuadro 5. Evaluada en el cultivo de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo y establecidos en bolsas y en maceta. El número de entrenudos de la planta aumentó de manera ascendente a lo largo de las tres fechas de evaluación tanto en bolsa como en maceta. En bolsa, no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas lo que indica un comportamiento homogéneo del cultivo bajo las condiciones de manejo evaluadas (Tukey, $P \leq 0.05$). En maceta durante la Fecha 1 se observaron diferencias estadísticas significativas, donde los tratamientos Tr+F y F presentaron mayor número de entrenudos en comparación con Tr+A y T0. En la Fecha 2 no se detectaron diferencias significativas entre la mayoría de los tratamientos. Para la Fecha 3, se presentaron nuevamente diferencias estadísticas, destacando el tratamiento F con el mayor número de entrenudos, mientras que Tr+A y T0 mostraron los valores más bajos.

El comportamiento del número de entrenudos reflejó una respuesta claramente dependiente del sistema de cultivo. En condiciones de bolsa, la ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos durante las tres fechas de evaluación indica que el ambiente radicular ofreció condiciones suficientemente estables para sostener un crecimiento vegetativo continuo, independientemente de la aplicación de *Trichoderma* o fertilización. Este tipo de respuesta ha sido reportado en sistemas con mayor volumen de sustrato, donde la planta presenta una menor sensibilidad a estímulos externos por una adecuada disponibilidad de agua y nutrientes (Gruda & Schnitzler, 2006; Adams & Ho, 1993).

Cuadro 5. Número de entrenudos en planta de tomate en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1	2	3			
BOLSA	Tr+F	33.750	a	40.00	a	44.25	a
	F	36.125	a	42.00	a	46.25	a
	Tr+A	34.500	a	42.25	a	51.75	a
	T0	35.750	a	42.75	a	48.5	a
MACETA	Tr+F	35.75	a	41.375	a	47.250	ab
	F	33.50	ab	38.625	ab	49.625	a
	Tr+A	30.25	b	36.250	ab	47.000	b
	T0	29.50	b	34.500	b	41.750	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En maceta, por el contrario, se observó una respuesta más contrastante entre tratamientos, especialmente en la Fecha 1 y la Fecha 3. El mayor número de entrenudos registrado en los tratamientos Tr+F y F durante la Fecha 1 evidencia que la disponibilidad inicial de nutrimentos favoreció la rápida diferenciación nodal y elongación del tallo, procesos estrechamente regulados por el suministro de nitrógeno y la actividad hormonal, particularmente de auxinas y giberelinas (Taiz *et al.*, 2015; Davies, 2010). En contraste, los menores valores observados en Tr+A y T0 confirman que la limitación nutrimental inicial restringe el ritmo de formación de entrenudos.

La homogeneidad observada en la Fecha 2 sugiere un periodo de compensación fisiológica, donde las plantas redistribuyeron recursos para mantener el crecimiento estructural, aun bajo condiciones de restricción radicular. Este fenómeno ha sido descrito como una fase de ajuste dinámico del crecimiento en cultivos en contenedor, en la que el desarrollo longitudinal se estabiliza temporalmente (Poorter *et al.*, 2012).

Para la Fecha 3, la superioridad del tratamiento F en maceta confirma que el suministro continuo de nutrimentos minerales fue determinante para sostener la formación de nuevos entrenudos. La fertilización favorece directamente la tasa de división celular en

los meristemas intercalarios, responsables del alargamiento del tallo y la generación de nudos sucesivos, lo que impacta positivamente el número potencial de racimos florales (Atherton & Harris, 1986; Heuvelink, 2005). En contraste, los valores persistentemente bajos de Tr+A y T0 muestran que la aplicación aislada de *Trichoderma* no fue suficiente para suplir la demanda nutrimental bajo las condiciones restrictivas impuestas por la maceta.

En conjunto, estos resultados confirman que el número de entrenudos es altamente sensible al manejo nutrimental y al volumen radicular disponible, y que los beneficios del *Trichoderma* sobre la arquitectura vegetal se expresan con mayor claridad únicamente cuando existe un adecuado respaldo nutricional. Este comportamiento coincide con lo reportado por estudios previos en tomate bajo sistemas de cultivo intensivo, donde la fertilización adecuada sigue siendo el principal factor que regula la expresión del crecimiento estructural del tallo (Heuvelink, 2005; Taiz *et al.*, 2015).

6.4 Peso del fruto en bolsas y macetas

La variable peso del fruto de tomate se presenta en el Cuadro 6. Evaluada en el cultivo de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo establecidos en bolsas y en maceta. En bolsa durante la Fecha 1 se observaron diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$), donde el tratamiento T0 registró el mayor peso de fruto diferenciándose estadísticamente de Tr+F y Tr, mientras que F mostró un comportamiento intermedio. En las Fechas 2 y 3, no se detectaron diferencias estadísticas significativas. En maceta, durante las Fechas 1 y 2 no se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 3 sí se observaron diferencias significativas, donde los tratamientos Tr+F y Tr mostraron los mayores pesos de fruto, mientras que F y T0 presentaron los valores más bajos, diferenciándose estadísticamente.

El peso del fruto es uno de los indicadores más sensibles del estado nutrimental y fisiológico del cultivo, al integrar los efectos del crecimiento vegetativo, la eficiencia fotosintética y la capacidad de traslocación de asimilados hacia los órganos reproductivos. En el presente estudio, el comportamiento del peso del fruto mostró una respuesta diferencial entre el sistema de bolsa y maceta, así como entre fechas de

evaluación, lo que evidencia la influencia conjunta del volumen radicular, la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del sustrato.

Cuadro 6. Rendimiento por planta (kg planta⁻¹) de tomate establecido en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	70.29032	b	81.3125	a	123.0000	a
	F	78.72414	ab	90.1875	a	120.6250	a
	Tr	69.00000	b	94.68750	a	112.5000	a
	T0	92.60000	a	86.4375	a	113.3125	a
MACETA	Tr+F	59.21875	a	98.53125	a	120.0938	a
	F	63.17241	a	93.62500	a	101.9062	b
	Tr	67.56250	a	100.18750	a	123.3750	a
	T0	57.00000	a	88.43750	a	89.5000	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En bolsa, durante la Fecha 1 (Cuadro 6), el mayor peso de fruto observado en el testigo absoluto (T0) sugiere que, en etapas tempranas del ciclo, la demanda nutricional del fruto aún no es elevada y puede ser cubierta por las reservas iniciales del sustrato. Este comportamiento inicial ha sido descrito en tomate bajo condiciones de cultivo protegido, donde los frutos de los primeros racimos no siempre reflejan de inmediato los efectos del manejo nutricional (Hartz & Hochmuth, 1996). La ausencia de diferencias estadísticas en las Fechas 2 y 3 indica que, una vez avanzado el ciclo productivo, el volumen de sustrato en bolsa permitió una mayor estabilidad en la absorción de agua y nutrientes, amortiguando el efecto de los tratamientos sobre el peso del fruto.

En maceta, durante las Fechas 1 y 2, la ausencia de diferencias significativas confirma que en fases tempranas del llenado del fruto el sistema radicular aún logra satisfacer la demanda metabólica del fruto de manera similar entre tratamientos. No obstante, en la Fecha 3, se observaron diferencias claras, donde los tratamientos Tr+F y Tr

registraron los mayores pesos de fruto, mientras que F y T0 presentaron los valores más bajos. Este resultado pone de manifiesto el efecto positivo de *Trichoderma* sobre el llenado final del fruto, especialmente bajo condiciones de restricción radicular como las impuestas por la maceta.

Diversos estudios han demostrado que especies de *Trichoderma* favorecen la absorción de nutrimentos, mejoran la arquitectura radicular y estimulan la actividad fisiológica de la planta mediante la producción de fitohormonas y la inducción de tolerancia al estrés (Harman et al., 2004; Shoresh et al., 2010). Estas interacciones simbióticas explican el mayor peso de fruto observado en los tratamientos con *Trichoderma*, particularmente en las etapas finales del ciclo, cuando la demanda de carbohidratos y nutrimentos es máxima.

Por otro lado, los menores pesos registrados en los tratamientos F y T0 en maceta durante la Fecha 3 reflejan los efectos negativos de la restricción física del sistema radical y la limitada disponibilidad de nutrimentos en un volumen reducido de sustrato, condiciones que reducen la eficiencia en la translocación de fotoasimilados hacia el fruto (Raviv & Lieth, 2008). La deficiencia nutrimental durante el llenado del fruto afecta directamente procesos como la síntesis de almidón, azúcares estructurales y compuestos de reserva, disminuyendo el tamaño final del fruto (Marschner, 2012).

En términos fisiológicos, el mayor peso del fruto en los tratamientos con *Trichoderma* se asocia también a una mejor eficiencia fotosintética y mayor actividad metabólica de los tejidos reproductivos, lo que permite una mayor acumulación de materia seca y agua en el fruto, factores determinantes del rendimiento comercial (Kader, 2002). Estos resultados coinciden con lo reportado en múltiples estudios donde la combinación de microorganismos benéficos y manejo nutrimental adecuado incrementa significativamente el peso individual del fruto en tomate bajo sistemas intensivos de producción.

En conjunto, los resultados confirman que el peso del fruto en tomate es altamente dependiente del sistema de cultivo, del manejo nutrimental y de la interacción con

microorganismos benéficos, observándose un efecto más marcado de *Trichoderma* en condiciones de mayor estrés radicular, como las impuestas por la maceta.

6.5 Diámetro ecuatorial del fruto en bolsas y macetas

La variable diámetro ecuatorial del fruto de tomate se presenta en el Cuadro 7. Evaluada en el cultivo de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo establecidos en bolsas y en maceta. El diámetro ecuatorial del fruto no presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en bolsa durante las tres fechas de evaluación, (Tukey, $P \leq 0.05$). En maceta durante las Fechas 1 y 2 tampoco se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 3 sí se presentaron diferencias significativas, donde los tratamientos Tr+F y Tr registraron los mayores diámetros ecuatoriales, diferenciándose estadísticamente de F y T0, que mostraron los valores más bajos.

En bolsa, la ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos durante las tres fechas de muestreo indica que el volumen de sustrato y la disponibilidad nutrimental fueron suficientes para sostener un crecimiento uniforme del fruto, independientemente de la aplicación de *Trichoderma* o fertilización. Este comportamiento ha sido descrito en sistemas con mayor capacidad de exploración radicular, donde el tamaño del fruto tiende a depender más del potencial genético del cultivar y de las condiciones ambientales que del manejo biológico específico (Heuvelink, 2005). Además, la estabilidad del diámetro ecuatorial sugiere que no existieron limitaciones hídricas ni nutricionales que afectaran la expansión celular del pericarpo.

Cuadro 7. Diámetro ecuatorial del fruto de tomate en plantas establecidas en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	43.56226	a	46.99625	a	53.62875	a
	F	44.96069	a	48.31094	a	53.83250	a
	Tr	44.00000	a	49.01375	a	52.90313	a
	T0	47.01333	a	46.85125	a	52.19188	a
MACETA	Tr+F	40.73677	a	49.05562	a	53.63344	a
	F	42.09172	a	48.76406	a	50.95312	b
	Tr	42.57125	a	51.03667	a	54.67250	a
	T0	40.52615	a	48.88188	a	49.14062	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En maceta, durante las Fechas 1 y 2, la igualdad estadística entre tratamientos confirma que en las etapas iniciales del crecimiento del fruto el suministro de fotoasimilados fue suficiente para un desarrollo homogéneo del diámetro ecuatorial. Sin embargo, en la Fecha 3 se presentaron diferencias significativas, donde los tratamientos Tr+F y Tr alcanzaron los mayores diámetros, superando estadísticamente a F y T0. Este comportamiento evidencia que, bajo condiciones de restricción radicular, la acción de *Trichoderma* adquiere mayor relevancia en la etapa final del llenado del fruto. Diversos estudios han demostrado que *Trichoderma* estimula el crecimiento vegetal mediante la producción de auxinas, giberelinas y compuestos señalizadores que favorecen la expansión celular de los tejidos del fruto, lo que se traduce en un incremento del diámetro y del peso final (López-Bucio *et al.*, 2015). Asimismo, se ha comprobado que estos microorganismos mejoran la eficiencia en la absorción de potasio, calcio y magnesio, nutrientes clave en la formación del tamaño y firmeza del fruto (Altomare *et al.*, 1999; Gupta & Huang, 2014).

Los menores diámetros observados en los tratamientos F y T0 en maceta durante la Fecha 3 reflejan los efectos negativos de la limitación física del sistema radical, que reduce la absorción de agua y nutrimentos en la fase de mayor demanda fisiológica del fruto. Este fenómeno es común en cultivos en contenedor con volúmenes reducidos de sustrato, donde el estrés radicular limita la expansión celular del fruto y, por ende, su diámetro ecuatorial (Stutte, 2016).

Desde el punto de vista fisiológico, el incremento del diámetro ecuatorial en los tratamientos con *Trichoderma* se asocia a una mayor tasa de división y elongación celular en el pericarpo del fruto, favorecida por un mejor balance hormonal, una mayor conductancia estomática y una mayor disponibilidad de asimilados durante la maduración (Dorais *et al.*, 2001). Estos resultados coinciden con lo reportado en sistemas intensivos de tomate, donde la interacción microorganismo planta juega un papel determinante en la fase final de crecimiento del fruto.

6.6 Diámetro polar del fruto en bolsas y maceta

La variable diámetro polar del fruto de tomate se presenta en el Cuadro 8. Evaluada en el cultivo de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo y establecidos en bolsas y en maceta. El diámetro polar del fruto presentó diferencias estadísticas entre tratamientos en bolsa únicamente en la Fecha 1 (Tukey, $P \leq 0.05$), donde el tratamiento T0 registró el mayor valor, diferenciándose de Tr+F y Tr, mientras que F mostró un comportamiento intermedio. En las Fechas 2 y 3 en bolsa, no se observaron diferencias estadísticas significativas. En maceta durante la Fecha 1 no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 2 se presentaron diferencias estadísticas, donde Tr+F mostró el mayor diámetro polar, diferenciándose de Tr y T0, mientras que F tuvo un comportamiento intermedio. En la Fecha 3 también se registraron diferencias significativas, observándose los mayores valores en Tr+F y Tr, y los menores en F y T0.

En bolsa únicamente en la Fecha 1 se detectaron diferencias estadísticas, donde el tratamiento T0 presentó el mayor diámetro polar, superando a Tr+F y Tr. Este comportamiento inicial puede explicarse por una respuesta compensatoria temprana en ausencia de competencia microbiana en el sistema radical, donde la planta prioriza

el crecimiento del fruto utilizando reservas iniciales del sustrato. No obstante, en las Fechas 2 y 3, la ausencia de diferencias revela que, bajo condiciones de mayor estabilidad hídrica y nutrimental que ofrece la bolsa, el diámetro polar del fruto tiende a uniformarse entre tratamientos, situación ampliamente reportada en sistemas con volumen suficiente de sustrato (Raviv & Lieth, 2008).

Cuadro 8. Diámetro polar del fruto de tomate en plantas establecidas en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	68.94419	b	70.77844	a	77.00531	a
	F	73.98690	ab	73.31312	a	75.35656	a
	Tr	68.01357	b	75.20750	a	78.24312	a
	T0	77.67467	a	70.67312	a	77.65375	a
MACETA	Tr+F	64.53250	a	75.77813	a	75.04125	a
	F	67.07207	a	72.25719	ab	68.68375	b
	Tr	69.82000	a	70.42938	b	74.26125	a
	T0	65.01538	a	68.34562	b	67.10750	b

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En maceta durante la Fecha 1 no se observaron diferencias, lo que indica que el crecimiento inicial del fruto no estuvo condicionado por los tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 2, el tratamiento Tr+F presentó el mayor diámetro polar, diferenciándose de Tr y T0, mientras que F mostró un comportamiento intermedio, lo cual evidencia que la sinergia entre *Trichoderma* y la fertilización favoreció el alargamiento del fruto en condiciones de restricción radicular. Este efecto se intensificó en la Fecha 3, donde Tr+F y Tr registraron los mayores valores, confirmando que el hongo benéfico mejora el desarrollo longitudinal del fruto en ambientes más limitantes.

Este resultado se sustenta en que *Trichoderma* estimula el crecimiento vegetal mediante la modulación de fitohormonas como auxinas y giberelinas, responsables directas de la elongación celular del fruto (Vinale *et al.*, 2008). Además, se ha

demostrado que estos microorganismos incrementan la actividad metabólica de la rizosfera, favoreciendo la absorción de nutrientes esenciales durante la fase de llenado del fruto, especialmente nitrógeno, potasio y calcio, elementos determinantes para el crecimiento polar (Yedidia *et al.*, 2001).

Los menores valores observados en F y T0 durante la Fecha 3 en maceta confirman que, bajo limitación física del sistema radical, la fertilización convencional sin apoyo biológico no es suficiente para sostener un adecuado crecimiento longitudinal del fruto. La restricción radicular reduce la conductividad hidráulica, limita el flujo de fotoasimilados y afecta directamente la expansión celular del pericarpo, situación ampliamente descrita en sistemas de producción en contenedores de bajo volumen (NeSmith & Duval, 1998).

Desde el enfoque fisiológico, el mayor diámetro polar obtenido con Tr+F y Tr se asocia a una mayor eficiencia fotosintética y a una mejor partición de asimilados hacia el fruto, lo que favorece su alargamiento y calidad comercial. De acuerdo con Marschner (2012), el adecuado suministro nutrimental en la etapa de crecimiento activo del fruto es esencial para mantener la presión de turgencia celular requerida para la elongación del pericarpo.

6.7 Sólidos solubles totales del fruto en bolsas y macetas

La variable sólidos solubles totales (Brix) se presenta en el Cuadro 9. Evaluada en frutos de tomate, bajo distintos tratamientos medidos en 3 fechas del desarrollo del cultivo y establecidos en bolsas y en maceta. El contenido de sólidos solubles totales (°Brix) del fruto no presentó diferencias estadísticas significativas en la Fecha 1 en ninguno de los sistemas (bolsa y maceta), (Tukey, $P \leq 0.05$). En bolsa, durante la Fecha 2 se presentaron diferencias significativas, donde el tratamiento F registró el menor valor de °Brix, diferenciándose de Tr, mientras que Tr+F y T0 mostraron valores intermedios. En la Fecha 3 en bolsa, también se observaron diferencias significativas, destacando Tr, Tr+F y T0 con los valores más altos, y F con el menor contenido de sólidos solubles. En maceta, durante las Fechas 1 y 2 no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Sin embargo, en la Fecha 3 sí se presentaron

diferencias significativas, donde F presentó el menor valor de °Brix, mientras que Tr+F, Tr y T0 mostraron valores mayores y estadísticamente similares entre sí.

Los sólidos solubles totales (°Brix) constituyen un parámetro fundamental de calidad del fruto, ya que reflejan la acumulación de azúcares, ácidos orgánicos y otros compuestos solubles asociados al sabor y al valor comercial del tomate. En el presente estudio, este atributo mostró una respuesta diferencial de acuerdo con el sistema de cultivo, la fecha de evaluación y el tratamiento aplicado, evidenciando la influencia conjunta del manejo nutrimental y del ambiente radicular. En la Fecha 1 (Cuadro 9), la ausencia de diferencias estadísticas en ambos sistemas (bolsa y maceta) indica que, durante la etapa inicial de desarrollo del fruto, la acumulación de azúcares fue similar entre tratamientos, lo cual sugiere que el metabolismo del fruto aún depende en gran medida de las reservas de la planta y del metabolismo basal de la fotosíntesis. Esta respuesta ha sido reportada en frutos en fases tempranas, donde la translocación de carbohidratos aún no alcanza su máximo potencial (Dorais, 2007).

En bolsa, durante la Fecha 2 (Cuadro 9), el tratamiento F presentó el menor contenido de °Brix, diferenciándose de Tr, mientras que Tr+F y T0 mostraron valores intermedios. Este resultado sugiere que la fertilización convencional, aplicada de forma aislada, favoreció el crecimiento vegetativo por encima de la acumulación de azúcares, generando un efecto de dilución en el fruto. Según Peet y Willits (1998), un suministro elevado de nitrógeno suele reducir el contenido de sólidos solubles al priorizar la expansión celular sobre la síntesis de carbohidratos.

Cuadro 9. Solidos solubles totales (Brix) de frutos de tomate establecidos en bolsa y macetas bajo tratamientos a base de *Trichoderma* y fertilización convencional.

		FECHA					
Tratamiento		1		2		3	
BOLSA	Tr+F	9.387097	a	8.09375	ab	9.15625	a
	F	9.517241	a	7.53125	b	8.00000	b
	Tr	10.071429	a	8.56250	a	9.81250	a
	T0	9.533333	a	8.18750	ab	9.43750	a
MACETA	Tr+F	10.68750	a	9.8125	a	9.03125	ab
	F	10.79310	a	10.0000	a	8.71875	b
	Tr	11.31250	a	9.8750	a	9.50000	ab
	T0	10.69231	a	9.5625	a	9.81250	a

Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Tr+F: *Trichoderma asperellum* + fertilizante, F= fertilizante, Tr= *Trichoderma asperellum*, T0= testigo absoluto.

En la Fecha 3 en bolsa, nuevamente se observaron diferencias significativas, donde Tr, Tr+F y T0 registraron los valores más altos, mientras que F presentó el menor contenido de °Brix. Este comportamiento confirma que la sola fertilización convencional no favorece la concentración de azúcares en el fruto, mientras que la presencia de *Trichoderma* promueve una mayor eficiencia fisiológica de la planta. Este efecto se asocia a una mejor absorción de potasio y a la optimización de la fotosíntesis, procesos directamente relacionados con la síntesis y movilización de azúcares hacia el fruto (Zhang *et al.*, 2013).

En maceta, durante las Fechas 1 y 2 no se detectaron diferencias significativas, lo que indica que, bajo condiciones de restricción del volumen radicular, el cultivo mantuvo un metabolismo similar en la fase inicial del llenado del fruto. Sin embargo, en la Fecha 3, el tratamiento F presentó el menor valor de °Brix, mientras que Tr+F, Tr y T0 mostraron valores mayores y estadísticamente similares. Esto pone de manifiesto que, en un sistema más limitante como la maceta, la inoculación con *Trichoderma* mejora la eficiencia en la captación de nutrimentos y en la síntesis de carbohidratos, favoreciendo la calidad del fruto.

Diversos estudios han demostrado que *Trichoderma* incrementa la actividad de las enzimas involucradas en el metabolismo del carbono y mejora la translocación de fotoasimilados hacia los frutos, lo cual se traduce en mayores valores de °Brix (Harman *et al.*, 2004). Asimismo, la acumulación de azúcares se encuentra estrechamente ligada al estado nutricional de la planta, particularmente al potasio, elemento clave en el transporte de azúcares por el floema (Amjad *et al.*, 2014). El comportamiento inferior del tratamiento F en ambas condiciones de cultivo confirma que un manejo basado únicamente en fertilización mineral puede favorecer el rendimiento, pero no necesariamente mejora la calidad interna del fruto. En contraste, la presencia de *Trichoderma*, solo o en combinación con fertilizante, permitió mantener contenidos de sólidos solubles más altos y estables, incluso bajo condiciones de mayor estrés como la maceta.

En conjunto, los resultados demuestran que la acumulación de sólidos solubles en el fruto está más relacionada con la eficiencia fisiológica de la planta que con el simple suministro de nutrimentos, y que *Trichoderma* representa una herramienta biotecnológica eficaz para mejorar la calidad del tomate en sistemas de producción con restricción del volumen radicular.

7.CONCLUSIÓN

La aplicación de *Trichoderma asperellum*, particularmente en combinación con la fertilización convencional, demostró ser una estrategia eficaz para mejorar el crecimiento vegetativo, el rendimiento y algunos atributos de calidad del fruto de tomate. Si bien en el sistema de bolsa no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos, en el sistema de maceta sí se evidenció una respuesta significativa del cultivo, destacando los tratamientos Tr+F y Tr en variables como longitud del tallo, número de entrenudos, peso del fruto, diámetro del fruto y sólidos solubles totales. Estos resultados confirman que el efecto benéfico de *Trichoderma asperellum* se expresa con mayor claridad bajo condiciones de mayor restricción nutrimental, donde el bioinoculante favorece la absorción de nutrientes, el desarrollo radicular y el crecimiento de la planta. En conjunto, el uso integrado de *Trichoderma asperellum* y fertilización convencional se presenta como una alternativa agronómica viable, sostenible y técnicamente sólida para incrementar la productividad y calidad del cultivo de tomate en sistemas de producción en maceta.

8.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. B., Oliveira, M. F., Medeiros, E. V., y Silva, E. S. (2019). Potential of *Trichoderma asperellum* strains for plant growth promotion and control of damping-off in tomato. *Journal of Phytopathology*, 167(2), 107–115.
- Arias Rodas, F. E. (2016). Evaluación de dos cepas de *Trichoderma T. harzianum* y *T. koningii* como estimulantes del desarrollo radicular de estacas de mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca.
- Banco de México. (2023). Estadísticas de balanza de pagos: Exportaciones e importaciones.
- Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, 7(4), 249–260. <https://doi.org/10.2436/im.v7i4.9547>
- Bhat, Z. A., Wani, S. H., Khan, A. A., & Khan, M. (2018). Role of *Trichoderma* in agricultural system: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(10), 101–115.
- Bustamante Lara, T. I., García González, F., Vargas Canales, J. M., & León-Andrade, M. (2022). Efectos del comercio internacional en la especialización y competitividad del jitomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) en México. *Paradigma Económico*, 14(1), 181–206.
- Castelán-Estrada, M., De la Mora-Orozco, C., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., & Pérez-Arias, G. A. (2018). Fenología y producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en ambiente protegido. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 24(3), 205–217.
- Castellanos, J. Z., & Muñoz, R. J. J. (2003). Manual de producción hortícola en invernadero (2.ª ed.). Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura.
- Céspedes, C., Sánchez, L., Hernández, N., Núñez-Ramos, I., & Almonte, I. (2022). [Documento técnico sobre producción agrícola]. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales.

- Chowdhury, P. K., Bhardwaj, A. K., & Saxena, A. K. (2019). Effect of *Trichoderma viride* on growth and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 10(5), 481–487.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L. I., Cortés-Rodríguez, L., Herrera-Rivera, M. A., & Larralde-Corona, C. P. (2022). *Trichoderma* species: Current perspectives on their role in plant growth promotion and protection. *Microbial Ecology*, 83(1), 1–17.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L. I., & López-Bucio, J. (2016). The plant growth-promoting fungus *Trichoderma viride* regulates root architecture and promotes nutrient acquisition of *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Plant Physiology*, 203, 16–24.
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., y López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens* enhances biomass production and promotes lateral root growth. *Plant Physiology*, 149(3), 1579–1592.
- Cubillos-Hinojosa, J. G., Orozco-Mosqueda, M. C., & Contreras-Cornejo, H. A. (2022). Unveiling the fungal taxonomy: From morphology to multi-locus phylogeny. *Frontiers in Microbiology*, 13, 880628.
- Cubillos-Hinojosa, J., Valero, N., & Mejía, L. (2009). *Trichoderma harzianum* como promotor del crecimiento vegetal del maracuyá. *Agronomía Colombiana*, 27(1), 53–60.
- Druzhinina, I. S., Kopchinskiy, A. G., & Kubicek, C. P. (2019). The *Trichoderma* multigene phylogeny. *Mycologia*, 111(3), 565–572.
- Druzhinina, I. S., et al. (2011). *Trichoderma*: The genome and its biotechnology. *Microbiology*, 157(1), 23–34.
- Esparza-Reynoso, S., & López-Bucio, J. (2021). Importancia de los exudados de las raíces en el diálogo entre *Trichoderma* y las plantas. *Redagráfica*.
- FAO. (2020). *FAO statistical yearbook: World food and agriculture*. FAO.
- González-Ramírez, M. E., Valenzuela-Ruiz, V. J., Galindo-Estrada, F. L., & Armenta-Bojórquez, A. D. (2019). Efecto de *Trichoderma harzianum* en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1545–1558.

- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.
- Harman, G. E., Kubicek, C. P., & Druzhinina, I. S. (2021). *Trichoderma* for plant disease control. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 503–524.
- INEGI. (2022). *Censo agropecuario 2022*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Kader, A. A. (2008). Flavor quality of fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(11), 1863–1868.
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R., & Herrera-Estrella, A. (2015). *Trichoderma* as biostimulant. *Scientia Horticulturae*, 196, 109–123.
- Lorito, M., Woo, S. L., & Harman, G. E. (2019). *Trichoderma* biology and plant disease control. *Plant Pathology*, 68(6), 1109–1118.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.
- Nuez, F. (1995). *El cultivo del tomate*. Mundi-Prensa.
- Orona-Castillo, I., et al. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción de tomate bajo agricultura protegida. *Biotecnia*, 24(3), 70–76.
- Ramírez, H., et al. (2018). P-Ca, AG4/7 y 6-BAP en la fisiología y nutrición de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(4), 747–759.
- Saravanakumar, D., et al. (2017). Management of tomato diseases using *Trichoderma*. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 8(1), 1000366.
- Smith, D., & Jones, A. (2020). Plant growth response to nutrient availability in container systems. Springer.
- Shahid, A., et al. (2021). Effect of *Trichoderma harzianum* on growth, yield and fruit quality of tomato. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 12(3), 1000523.

- Sharma, S., et al. (2021). *Trichoderma* as a plant growth stimulator. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 101–118.
- SIAP. (2023). Balanza comercial agroalimentaria de México.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Adams, P., & Ho, L. C. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and consequences for blossom-end rot. *Journal of Horticultural Science*, 68(5), 809–821.
- Altomare, C., Norvell, W. A., Björkman, T., & Harman, G. E. (1999). Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2926–2933.
- Amjad, M., Akhtar, J., Anwar-ul-Haq, M., Imran, S., & Jacobsen, S.-E. (2014). Soil and foliar application of potassium enhances fruit yield and quality of tomato under salinity. *Turkish Journal of Biology*, 38(2), 208–218.
- Atherton, J. G., & Harris, G. P. (1986). *The tomato crop: A scientific basis for improvement*. Chapman and Hall.
- Davies, P. J. (2010). *Plant hormones: Biosynthesis, signal transduction, action!* (3rd ed.). Springer.
- Dorais, M. (2007). Organic production of vegetables: State of the art and challenges. *Canadian Journal of Plant Science*, 87(5), 1057–1081.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239–319.
- Gruda, N., & Schnitzler, W. H. (2006). The effect of water supply on tomato yield and quality under different water systems. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 80(2), 194–198.
- Gupta, S. K., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 2014, 701596.

- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.
- Hartz, T. K., & Hochmuth, G. J. (1996). Fertility management of drip-irrigated vegetables. *HortTechnology*, 6(2), 168–172.
- Heuvelink, E. (2005). *Tomatoes*. CABI Publishing.
- Kader, A. A. (2002). Postharvest biology and technology: An overview. En A. A. Kader (Ed.), *Postharvest technology of horticultural crops* (pp. 39–47). University of California, Division of Agriculture and Natural Resources.
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R., & Herrera-Estrella, A. (2015). *Trichoderma* as biostimulant: Exploiting its multilevel mechanisms for plant growth promotion. *Plant Science*, 239, 1–15.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- NeSmith, D. S., & Duval, J. R. (1998). The effect of container size on plant growth. *HortTechnology*, 8(4), 495–498.
- Peet, M. M., & Willits, D. H. (1998). The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(3), 191–202.
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30–50.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier.
- Shoresh, M., Harman, G. E., & Mastouri, F. (2010). Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 21–43.
- Stutte, G. W. (2016). Containerized crop production and root restriction: Physiological implications. *Acta Horticulturae*, 1123, 23–30.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., y Lorito, M. (2008). *Trichoderma-plant-pathogen interactions*. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(1), 1–10.
- Yedidia, I., Benhamou, N., y Chet, I. (2001). Induction of defense responses in cucumber plants by the biocontrol agent *Trichoderma harzianum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(10), 4933–4943.

- Zhang, S., Zhao, J., Wu, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, X., y Hong, Y. (2013). Effects of *Trichoderma harzianum* on growth and development of tomato plants and rhizosphere microbial community. *African Journal of Biotechnology*, 12(21), 3133–3141.
- Woo, S. L., et al. (2018). *Trichoderma* as plant growth promoter. En S. L. Woo & M. Lorito (Eds.), *Trichoderma: Biology and applications* (pp. 51–78). Springer.