

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA



Uso de Nanopartículas en el Control del *Tobamovirus fructirugosum*
en el Cultivo de Tomate

Por:

MONSERRAT ISABEL GARCÍA CASTRO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA

Uso de Nanopartículas en el Control del *Tobamovirus fructirugosum*
en el Cultivo de Tomate

Por:

MONSERRAT ISABEL GARCÍA CASTRO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Aprobada por el Comité de Asesoría:

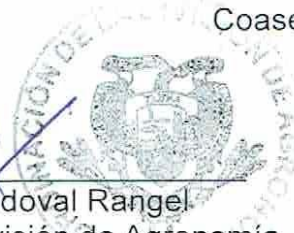

Dra. Yisa María Ochoa Fuentes
Asesor Principal


Dr. Juan Carlos Delgado Ortiz
Asesor Principal Externo


Dra. Mariana Beltrán Beache
Coasesor


Dr. Ernesto Cerna Chávez
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir la verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (Corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar, o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas , mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido o sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Isabel Garcia', is written over a horizontal line. The signature is enclosed within a large, loopy oval shape.

Monserrat Isabel García Castro

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por siempre acompañarme en los mejores y peores momentos, por enseñarme lo linda que puede ser la vida y por colocar en mi camino personas maravillosas que llenan mi existencia de alegría.

A **mis queridos padres**, la Sra. Elvira Castro Caballero y el Sr. Javier García Maldonado, quienes con amor, esfuerzo y dedicación supieron educarnos y apoyarnos incondicionalmente.

A **mis hermanas**, María Patricia García Castro y Victoria Belén García Castro, quienes me han ayudado incondicionalmente, brindándome ejemplos y consejos para construir mi camino y guiarme en momentos de oscuridad.

A **mi confidente** Laura Yamilet Pineda, con quien tuve la fortuna de coincidir desde mi primer día en la Narro. Gracias por ser mi lugar seguro, por escucharme siempre, por compartir risas, chismes y también lágrimas conmigo.

A mi **9,080.14 km de distancia, un océano Atlántico y ocho horas de diferencia**, Cayetano Aguilar, que a pesar de la distancia siempre sabe qué decir y cómo hacerse presente en mi vida. Gracias por alentarme, hacerme probar cosas nuevas con su "Ale a la aventura" y por darme tanto cariño.

A **mis abuelitos**, el Sr. Francisco González, la Sra. Faustina Téllez, la Sra. Elvira Barrientos y el Sr. Tomás Castro, que supieron encaminar y educar a mis padres en momentos difíciles.

A mi **mejor amiga**, Fabiola Avelino, amiga desde hace 11 años, a quien aunque no veo frecuentemente, llevo siempre en mi corazón. Estoy eternamente agradecida por todo lo que hemos compartido.

A **mis amigos** Luis, Rubicel, Abisai, Alvarito, Ricardo, Dianita, Yazmín, Libeth y Erick, quienes sin duda hicieron mi paso por la universidad inolvidable, lleno de risas, aprendizaje, bailes, desveladas e idas al ranchito.

Al **team Malezas Vip**: Luis, Marlen, Ricardo, Rubén, Fany, Cecilia, Alfaro y Kenia, quienes se ganaron un lugar especial en mi corazón y me enseñaron que cada persona tiene su propio lugar y que nunca es difícil ser uno mismo cuando estás con las personas correctas.

A mi "**llamada entrante**", Omar Alonso García, quien siempre ha estado conmigo en momentos difíciles, sorprendiéndome con una llamada en cualquier lugar, hora, en un día soleado o en un día lluviosos.

A mi **sensei**, la Mtra. Rocío Bartolo, con quien viví las mejores aventuras en España, ya sea en el suelo, en la playa, en el "escondite", o bailando y cantando a todo pulmón. Gracias por tus consejos de madrugada, y por enseñarme a levantarme después de cada caída jajaja. Sabes que te adoro.

Al **tío Paolo**, por esos podcasts interminables de 3 horas, incluso con 8 horas de diferencia horaria, por tus consejos y por acompañarme en los momentos de soledad. Gracias por mostrarme lo bello que es el senderismo, sobre todo cuando estás con la persona indicada, y por regalarme las vistas más hermosas que he visto.

A mis **padres adoptivos**, Karen y Damián, por cuidarme, regañarme y llamarme en horas poco decentes, por estar siempre conmigo y hacerme sentir parte de ustedes.

Al **Dr. Juan Carlos Delgado**, por acompañarme pacientemente en la culminación de mis estudios, por contestar mis dudas y sobre todo por no desesperarse después de un cultivo quemado y seguir dejándome ser su tesista.

Al **Mtro. Maestro Isaac Guajardo**, por brindarme siempre conversaciones llenas de risas, conocimiento y enseñarme comidas que no sabía que me gustaban.

A mis **roomies**, Janet, Brenda, Iram y Karen, quienes siempre han soportado mis interminables alarmas y aun así siguen queriéndome y apoyándome.

Al **internado Hidalgo**, especialmente a Estrellita y Pequeña, sin ellas las aventuras de mudanza no hubieran sido las mismas.

A mi **Alma Mater**, por permitirme crecer académicamente y ser el lugar de incontables experiencias.

A la **Dra. Yisa María Ochoa Fuentes** y al **Dr. Ernesto Cerna Chávez**, por hacer posible la culminación de esta etapa universitaria.

A todos ellos, muchas gracias.

Con cariño, Monserrat Isabel García Castro

DEDICATORIA

A mi madre, **Elvira Castro Caballero**, que siempre me ha cuidado ante mis interminables dolores de huesos, por estar siempre a mi lado y tratar de comprenderme incluso cuando no entendía lo que pasaba. Gracias por ser uno de mis pilares y ayudarme a convertirme en la persona que soy hoy.

A mi padre, **Javier García Maldonado**, quien siempre me ha acompañado, brindándome lecciones importantes de vida, por ser una persona a la que admiro y por guiarnos a ser personas de bien.

A mi hermana **Victoria Belén García Castro**, mi Merry, Merry, quien sin duda ha sido uno de los grandes pilares de mi educación, siempre cómplice e inspiración para encontrar mi lugar en el mundo. Siendo una de las personas que admiro y amo.

A mi hermana mayor, **María Patricia García Castro**, una de las personas más fuertes y rápidas que conozco, quien siempre me ha dado ejemplos a seguir y me ha permitido construir mi propio camino, con mis propias pausas, curvas y equivocaciones.

A mis **cómplices**: Yazmin, Yaz, Fabi y Cayetano, quienes, aunque no son familia de sangre, son familia por el cariño.

ÍNDICE

RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVO.....	2
1.2.1 Objetivos específicos	2
1.3 HIPOTÉISIS	2
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Importancia del cultivo.....	3
2.2 Importancia del cultivo del tomate en México	3
2.3 Generalidades del cultivo.....	4
2.4 Clasificación Taxonómica del tomate.....	4
2.5 Descripción botánica de <i>S. lycopersicum</i>	5
2.5.1 Tallo	5
2.5.2 Hojas y Flor	5
2.5.3 Fruto.....	5
2.5.4 Semilla	6
2.6 Principales plagas en el cultivo del tomate.....	6
2.6.1 Mosca blanca <i>Bemisia tabaci</i>	6
2.6.2 La paratrioza (<i>Bactericera cockerelli</i>)	7
2.6.3 Minador de la hoja (<i>Liriomyza</i> spp.)	8
2.6.4 Polilla del tomate <i>Tuta absoluta</i>	9
2.7 Enfermedades fungosas en tomate.....	10
2.7.1 Tizón tardío <i>Phytophthora infestans</i>	10
2.7.2 Tizón temprano <i>Alternaria solani</i>	11
2.8 Enfermedades bacterianas en tomate.....	11
2.8.1 Cáncer bacteriano (<i>Clavibacter michiganensis</i>).....	12
2.8.2 Necrosis de la médula del tomate (<i>Pseudomonas corrugata</i>).....	12
2.8.3 Costra bacteriana (<i>Xanthomonas campestris</i>)	13
2.9 Enfermedades Causadas por virus en el cultivo del tomate	14

2.10 Virus Rugoso Marrón del tomate causado por el <i>Tobamovirus fructirugosum</i>	14
2.10.1 Taxón del virus:.....	15
2.10.2 Sintomatología de <i>Tobamovirus fructirugosum</i> (ToBRFV).....	16
2.11 Uso de nanopartículas en la agricultura	17
2.12 Uso de nanotecnología para el control de virus.....	17
3 MATERIALES Y METODOS	21
3.1 Ubicación del experimento	21
3.2 Muestreo del material vegetativo	21
3.3 Material vegetal.....	21
3.4 Elaboración de la solución amortiguadora.....	22
3.5 Extracción del ToBRFV e inoculación del patógeno	22
3.6 Establecimiento de experimento en invernaderos	23
3.7 Variables a evaluar.....	24
3.8 Análisis estadístico.....	25
3.9 Extracción de ARN y amplificación por RT-PCR	25
4 RESULTADOS Y DISCUSION:.....	27
5 CONCLUSIONES	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo total del cultivo del tomate.....	4
Figura 2. Anatomía del fruto del tomate.	6
Figura 3. Ciclo de vida de psílido del tomate	8
Figura 4. Sintomatología de <i>Alternaria solani</i> en follaje y en tallo de plantas de tomate	11
Figura 5. Necrosis de la médula del tomate <i>Pseudomonas corrugata</i>	13
Figura 6. Distribución de <i>Tobamovirus fructirugoso</i>	15
Figura 7. Síntomas típicos inducidos por ToBRFV.....	16
Figura 8. Trasplante de plántulas.....	21
Figura 9. Preparación de inóculo en buffer tampón.	23
Figura 10. Distribución de plantas de tomate de acuerdo con los tratamientos	
Figura 11. Propuesta de escala de severidad de ToBRFV para el cultivo del tomate.	
Figura 12. Gel de agarosa para la detección del ToBRFV.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios sobre el tratamiento de enfermedades virales en plantas con el uso de nanopartículas.....	18
Tabla 2. Tratamientos aplicados en la evaluación de invernadero.....	24
Tabla 3. Progreso de la enfermedad en los diferentes tratamientos en la variedad Río Grande.....	29
Tabla 4. Efecto de los tratamientos en las variables agronómicas en plantas inoculadas con el <i>Tobamovirus fructirugosum</i>	31

RESUMEN

El tomate rojo (*Solanum lycopersicum*) es una de las hortalizas más importantes a nivel mundial por su valor nutricional y su impacto en la economía agrícola. México es uno de los principales productores y exportadores, generando empleo y más de 2,724 millones de dólares en exportaciones en 2023. El cultivo enfrenta amenazas como plagas y enfermedades virales, siendo el ToBRFV (*Tobamovirus fructirugosum*) una de las más perjudiciales, provocando pérdidas del 30 al 70% en los cultivos, transmitiéndose de manera mecánica o por semillas. Determinar la eficiencia de nanopartículas sobre plantas de tomate inoculadas con el *Tobamovirus fructirugosum*. Para evaluar estrategias de control, se aplicaron nanopartículas de cobre, zinc, óxido de zinc y un tratamiento referencia (Exodusmax®) en tres aplicaciones con un intervalo de 15 días, donde se evaluó la severidad y el desarrollo de parámetros agronómicos SPAD, peso fresco del tallo, grosor del tallo, largo radicular, peso fresco de raíz, altura de la planta y número de racimos. Siendo que la severidad fue reducida en un 13.2% por el tratamiento NpCu. Donde también se puede apreciar diferencia significativa en las variables agronómicas entre los tratamientos comparados con el control negativo; destacando como mejor tratamiento el NpCu. Donde los tratamientos con ZnO y las NpCu demostraron un comportamiento más estable, con mejoras en variables como las unidades SPAD, el peso fresco del tallo, el número de racimos y el peso fresco total.

Palabras clave: Tomate, ToBRFV, nanopartículas, severidad, *Tobamovirus fructirugosum*.

1 INTRODUCCIÓN

Tomate proviene del náhuatl, xictomatl, xictli = ombligo; tomohuac = fruto; atl = agua, “ombligo de fruta de agua” (SIAP, 2017). Sobre sale por la coloración roja, sabor ligeramente ácido y se suele utilizar en platillos por todo el mundo, motivo por el cual se ha incrementado la demanda de esta hortaliza. En México, es uno de los cultivos más importantes por su valor económico. Tan solo la producción de Otoño–invierno del 2024 se cosecharon 1,213,335 toneladas de tomate (SIAP, 2024).

Como consecuencia de los tratados de libre comercio firmados por México, hoy podemos exportar una gran variedad de productos, incluyendo hortalizas, semillas y, en este caso, tomates. Estos convenios comerciales han tenido un impacto significativo, como la facilitación de la exportación de productos. Aunque estos beneficios son bien conocidos, no podemos dejar las consecuencias secundarias, como la introducción de agentes fitopatógenos en el país. Un ejemplo es el ToBRFV provocado por *Tobamovirus fructirugosum*, que está presente en varios países. Entre el 2018 y 2019 fue confirmada la presencia del virus (ToBRFV) en México, Estados Unidos, China, Alemania, Turquía, Reino Unido e Italia (Nolasco-García et al., 2020)

El ToBRFV, por sus siglas en inglés, es un Tobamovirus que suele afectar los cultivos en todo el mundo, siendo el mecanismo de transmisión por semilla y de manera mecánica (SADER, 2019). Dado que el ToBRFV es demasiado estable es capaz de sobrevivir por largos periodos de tiempo en residuos de cultivos contaminados, estos cultivos deben ser manejado cuidadosamente para evitar una propagación. El virus ocasiona distintos síntomas como apariencia rugosa extrema, necrosis del pedúnculo y cáliz, coloración amarillenta de las venas de las hojas, tallos y hojas secas, manchas amarillas. Estos síntomas se presentan regularmente en

las hojas superiores y en periodos de estrés de la planta, (SADER, 2019). La severidad de los síntomas varía de acuerdo a la edad de las plantas al momento de la infección (SADER, 2019).

1.1 JUSTIFICACIÓN

En México, el tomate es uno de los cultivos más importantes, sin embargo, en los últimos años se ha visto afectado por virus, en especial por *Tobamovirus fructirugosum*, causante de Fruto Rugoso Marrón del Tomate (ToBRFV), el cual a causado perdidas del 30 al 70% en el cultivo. Debido al impacto que esta enfermedad tiene en la agricultura y a la falta de soluciones, resulta fundamental su estudio para desarrollar estrategias que mitiguen sus efectos.

1.2 OBJETIVO

Determinar la eficiencia de nanopartículas sobre plantas de tomate inoculadas con el *Tobamovirus fructirugos*

1.2.1 Objetivos específicos

- Evaluar la incidencia y severidad de la enfermedad *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV) en plantas de tomate tratadas con nanopartículas.
- Evaluar la eficiencia de las nanopartículas sobre parámetros agronómicos en tomates infectados con *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV).

1.3 HIPOTÉISIS

Se espera que al menos uno de los tratamientos evaluados retrase el desarrollo o reduzcan el nivel de daño ocasionado por el patógeno *Tobamovirus fructirugosum*, causante de la enfermedad Fruto Rugoso Marrón del Tomate.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del cultivo

El tomate rojo se denomina científicamente *Solanum lycopersicum* y es una de las hortalizas más producidas y consumidas en el mundo (Pérez-López-et al., 2024). Esta hortaliza se cultiva por ser un producto altamente apreciado en todas las clases sociales y es ampliamente utilizada en la industria alimentaria (Cepeda et al., 2009), gracias a su contenido de vitaminas, minerales, antioxidantes y su versatilidad en el consumo (Pérez-López-et al., 2024).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), entre 2007 y 2017 la superficie cosechada a nivel mundial fue de 4.8 millones de hectáreas, con un crecimiento anual del 1.4 % en ese período (FIRA, 2019). En 2017, el 55 % del volumen mundial importado se concentró en cuatro países: Estados Unidos (25.7 %), Alemania (12.3 %), Rusia (8.6 %) y Francia (8.5 %) (FIRA, 2019).

2.2 Importancia del cultivo del tomate en México

El cultivo de esta hortaliza genera empleo al sector Agrícola, es el sustento para un considerable número de familias en México, se estima que para la producción de 75,000 ha de tomate, se emplean a 172 mil trabajadores de campo (ASERCA, 1998). También, es una fuente productora de divisas para la nación, tan solo el tomate se posicionó entre los primeros cinco productos agroalimentarios que generaron más divisas al país, con exportaciones por dos mil 724 millones de dólares en 2023 (SADER, 2024).

México se ha constituido como referente en el mercado mundial, ya que las exportaciones de tomate se dirigen principalmente a Estados Unidos, Canadá, Japón, Emiratos Árabes entre otros. Los principales estados que lideran la producción son: Sinaloa con 702 mil 665 t; San Luis Potosí, con 423 mil 248 t; Michoacán, 302 mil 656 t; Morelos, 201 mil 364 t; Jalisco, 197 mil 937 y Baja California Sur con 167 mil 940 t (SADER, 2024).

2.3 Generalidades del cultivo

El tomate fue domesticado por los pueblos mesoamericanos hace aproximadamente 2,600 años, debido a esto, encontramos en México una amplia diversidad de colores, sabor y tamaño (SADER, 2022). El tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) es descrita como una planta arbustiva y en su forma silvestre tiene un ciclo de vida superior a un año (Délices *et al.*, 2019), es un cultivo perenne y se puede desarrollar de forma rastrera semi erecta o erecta dependiendo de la variedad (Agudelo & Polanco Puerta, 2019).

La fase de desarrollo vegetativo de la planta tiene cuatro subetapas que inicia desde la siembra, germinación, formación de hojas verdaderas y, por último, el transporte a campo. Cuando las plantas florecen iniciamos la etapa reproductiva que tiene una duración de 180 ddt (días después del trasplante), (Semaan Lince, 2015).

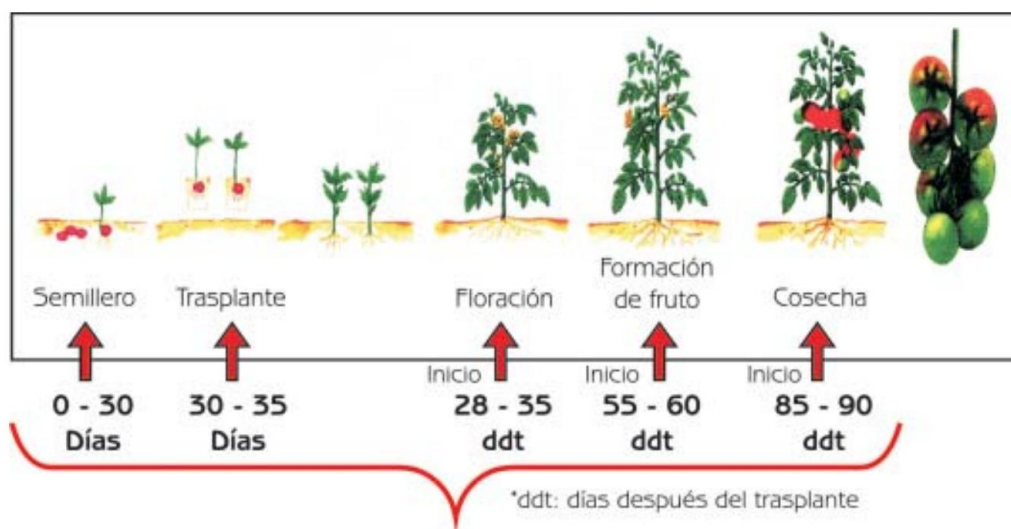


Figura 1. Ciclo total del cultivo del tomate, ciclo de 210 días. (Moreña, *et al.*, 2006)

2.1 Clasificación taxonómica del *Solanum lycopersicum* L.

Clasificación dada por Linneo, (EPPO, 1996)

Clase: Angiospermas

Orden: Solanales

Familia: Solánaceas

Género: *Solanum*

Especie: *lycopersicum*

2.2 Descripción botánica de *S. lycopersicum*

El tomate es una especie originaria de América, y es una planta herbácea de tallos semileñosos. La raíz principal es corta y ramificada en raíces secundarias. Al nivel de suelo, desarrolla raíces adventicias que le dan anclaje a la planta. En la parte exterior de la raíz se encuentran pelos absorbentes, y en su interior, se halla el córtex y el cilindro central, conformado por xilema (Escobar & Lee, 2009).

2.2.1 Tallo

Al inicio, el tallo crece de manera erecta, aunque con el tiempo tiende a curvarse a medida que la planta se desarrolla. Durante su crecimiento, va generando hojas y ramificaciones florales de forma alterna. En la axila de cada hoja, especialmente en las variedades de crecimiento indeterminado, surgen yemas laterales que deben eliminarse para evitar una proliferación excesiva. A lo largo del tallo, y alineados con las nervaduras de las hojas, aparecen numerosos pelos. Conforme maduran, el tallo engrosa, adquiere una tonalidad marrón verdosa y desarrolla una estructura acanalada o con costillas (Sirtori & Baffeli, 2020).

2.2.2 Hojas y Flor

Las hojas se unen al tallo mediante el peciolo. Son de tipo compuesto, pinnadas de borde dentado o redondeado dependiendo de la variedad que tengamos (Sirtori & Baffeli, 2020). En las variedades cultivadas, las flores las agrupamos en inflorescencias que pueden ser simples o ramificadas. Cada flor está conformada por entre 5 y 8 pétalos, sépalos y estambres, además de un ovario que contiene de 2 a 10 carpelos. Los estambres por su parte están soldados en una especie de cono que rodea el pistilo, (Blancar *et al.*, 2011).

2.2.3 Fruto

El fruto es una baya carnosa, tierna; y según la variedad depende el tamaño, color y consistencia, forma y el volumen del fruto. El tomate puede ir desde unos cuantos gramos hasta a más de un kilogramo (Blancar *et al.*, 2011).

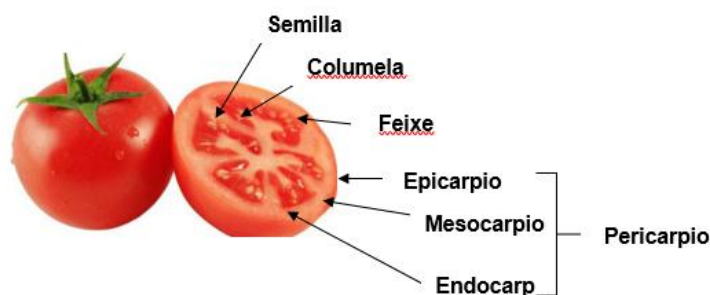


Figura 2. Anatomía del fruto del tomate.

2.2.4 Semilla

Las semillas son pequeñas de forma discoidal de color amarillo pajizo, cuando estas llegan al punto de maduración, adquieren una coloración de color marrón y una consistencia áspera (Sirtori & Baffeli, 2020). La semilla regularmente tiene una longitud de 1/6 a 1/8 pulgada (Fornaris, 2007).

2.3 Principales plagas en el cultivo del tomate

Uno de los riesgos más importantes para la producción de tomate son las plagas, que ocasionan pérdidas de rendimiento y como consecuencias pérdidas económicas. Entre las plagas más comunes tenemos *Bemisia tabaci*, *Bactericera cockerelli*, *Liriomyza sativae*, *Tuta absoluta*, *Agrotis ipsilon*, *Aphis gossypii*, *Myzus persicae*, *Corythucha passiflorae*, *Tetranychus urticae* y *Diabrotica balteata* entre otros (Bustillo, 1983).

2.3.1 Mosca blanca (*Bemisia tabaci*)

Las especies más comunes en el cultivo de tomate son *Bemisia tabaci* y *Trialeurodes vaporariorum*, siendo *Bemisia tabaci* la más peligrosa. *Bemisia tabaci* tiene capacidad de alimentarse y afectar a más de 600 especies de plantas (Bedford, 2020), que incluyen hortalizas y plantas ornamentales. Esta plaga afecta el rendimiento, la calidad del producto del cultivo, pues es conocida como vector de muchos virus. El ciclo biológico consiste en: huevo, cuatro estadios ninfales, pupa y adulto, que tiene una duración de 28 días aproximadamente cuando las temperaturas son de 20 a 22 °C (Estay, 2018). El adulto tiene cuerpo, patas y

antenas amarillas y mide aproximadamente 2 mm de largo, las ninfas son de color blanco y conforme van desarrollándose pasan a color verde con un tamaño de 0.84 mm de largo. Las pupas son blancas y opacas con ojos rojos (Estay, 2018)

Los daños por *Bemisia tabaci* se clasifica en dos; daños directos que son causados por la extracción de nutrientes que provocan debilitamiento en las plantas, madurez irregular de los frutos, deformación de hojas y clorosis en tallos. En los daños indirectos esta la excreción de sustancias azucaradas que favorecen el crecimiento de hongos como fumagina además de la transmisión de virus de las familias Geminiviridae del género *Begomovirus* de manera persistente, Carlavirus, Ipomovirus y Crinivirus (Bedford, 2020).

2.3.2 La paratrioza (*Bactericera cockerelli*)

Bactericera cockerelli o también conocida como pulgón saltador, salerillo o psílido de tomate, es una plaga de importancia económica de México y de muchos países, la importancia de esta plaga se basa en los daños que genera, de manera directa como el debilitamiento de la planta, deformación de frutos y hojas, de forma indirecta en la transmisión de procariontes como *Candidatus Liberibacter* (Chávez et al., 2021).

El insecto completa su ciclo de vida y dura en promedio 21 días. Tiene tres etapas de desarrollo: huevo, ninfa y adulto. El ciclo de vida inicia en oviposiciones, los huevos miden alrededor de 0.3 mm de largo y son de color amarillo con un pedicelo que lo une a la hoja, después pasan por cinco estadios ninfales y finalmente llega a adulto. El tamaño de los adultos es aproximadamente de 2.5 – 3 mm de largo y su principal diferencia son las bandas blancas en el abdomen en forma de V invertida sobre el cuerpo negro del insecto. Estos insectos han sido reportados como agentes causales de la punta morada a los fitoplasmas *Candidatus Phytoplasma aurantifolia*, así como de *Candidatus liberibacter solanacearum* agente causal de “papa rayada” (Cuesta et al., 2021).

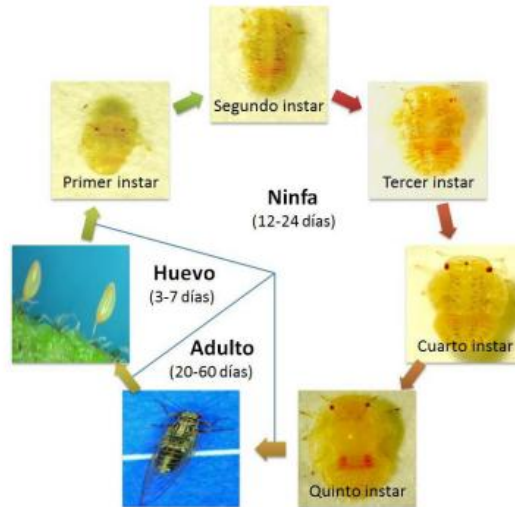


Figura 3. Ciclo de vida de psílido del tomate (adulto, oviposturas y ninfas).
(Castillo-Carrillo & Llumiquinga-Hormaza, 2021).

2.3.3 Minador de la hoja (*Liriomyza* spp.)

Liriomyza saltivae juega un papel muy importante en los cultivos, debido a su naturaleza multivoltina, sus hábitos de alimentación polífagos, la habilidad para desarrollar resistencia y la variabilidad de hospederos como hortalizas y ornamentales de valor económico e incluso puede sobrevivir en malezas (DGSV, 2021). Los primeros daños son causados cuando las hembras provocan heridas para alimentarse o para ovoposición, las punciones de alimentos por lo regular tienen un tamaño de 2 mm mientras que las punciones de ovoposición tienen un tamaño alrededor de 0.02 mm (EPPO, 2020). Los huevos son de color opaco que cambia con el desarrollo del embrión a blanco transparente (Barranco, 2007). La larva se desarrolla dentro de la hoja pasando por tres estadios larvarios, y son de forma cilíndrica, alargada, ápada y acéfala sin segmentos visibles. Las piezas bucales están formadas por un par de ganchos fuertemente aserrados. Tiene espiráculos posteriores formados de 3 a 12 microporos, según de la especie que se trate. El color de la larva para *L. trifolii* es amarilla y verdosa para el resto de las especies (Barranco, 2007). La larva de *Liriomyza* se alimenta del mesófilo de las hojas dejando intactas las capas externas y la epidermis, dejando una especie de “mina” perdiendo su capacidad fotosintética y defoliándose (Morales A. *et al.*, 1994). La pupa tiene forma de tonel, es de color amarillo a marrón rojizo, con tamaño que

osilla desde 1.5 – 2.3 mm de largo por 0.5 -0.8 de ancho. La cutícula de la pupa es segmentada, (Barranco, 2007).

Dependiendo de la etapa de vida en la que se encuentre *Liriomyza* la encontraremos en la planta, los huevos se quedan debajo de la superficie de la hoja, la larva la encontramos en las minas de las hojas, finalmente los adultos vuelan (EPPO, 2020).

2.3.4 Polilla del tomate *Tuta absoluta*

La polilla del tomate es una especie multivoltiva (OIRSA, 2010), en la actualidad está considerada como una de las plagas más importantes del cultivo del tomate debido a su rápida expansión y distribución geográfica (Vidal, 2018).

T. absoluta puede alimentarse en cualquier etapa de desarrollo de la planta, las hembras ovipositan casi siempre sobre las hojas, sobre los tallos nuevos, brácteas y superficie de los frutos verdes (Ruisánchez, 2013). Cuando pasa a larva, suele ser de color crema con la cabeza oscura pasando a color verdoso y ligeramente rosado y son eruciforme, después se convierten en pupa que inicialmente son de color verde olivo y antes de convertirse en adulto pasan a ser color marrón, los adultos miden aproximadamente 10 mm, con antenas filiformes y alas grises con manchas negras sobre las alas anteriores y en las alas posteriores presenta una banda de pelos o fleco fino en el borde posterior (Santos y Perera, 2010; López, 2010).

El daño comienza al emerger la larva del huevo que camina sobre la superficie de la hoja buscando un punto de penetración y rompiendo la epidermis de la hoja, estando en el interior de la hoja se alimenta del mesófilo formando galerías que limitan la capacidad fotosintética y la debilitan abriendo paso a posibles enfermedades fúngicas y bacterianas (Vidal, 2018).

Finalmente, cuando las larvas cumplen sus fases larvarias, la mayoría cae al suelo para pupar, mientras otras lo hacen directamente en otras partes de las plantas (Monserrat, 2008).

2.4 Enfermedades fungosas en tomate

Los hongos son incapaces de producir su propio alimento, por lo que parasitan a las plantas para alimentarse, obteniendo nutrientes, agua y enfermándolas. Los hongos que suelen afectar al tomate son: *Alternaria solani* (tizón temprano), *Phytophthora infestans* (tizón tardío), *Stemphylium solani* (mancha gris del tomate), *Fusarium oxysporum* (marchitez por fusarium), *Botrytis cinerea* (moho gris), *Oidium lycopersici* (polvillo o cenicilla), *Fusarium* spp, *Rhizoctonia* spp, *Pythium* spp (chupadera o mal de los almácigos), entre otros (Flores, Buono, & Giorgini, 2012).

2.4.1 Tizón tardío *Phytophthora infestans*

El tizón tardío afecta a tomate y papa, cultivos de importancia agronómica (Acuña *et al.*, 2019) esta enfermedad es policíclica que infecta el tallo y las hojas de las plantas. La diseminación de la enfermedad depende directamente de la relación planta huésped, patógeno, el medio ambiente y el manejo agronómico del cultivo (Díaz *et al.*, 2014). El inoculo lo podemos encontrar en semillas, desechos de papa, plantas voluntarias y otros hospederos susceptibles. El hongo se dispersa por el agua de lluvia y el viento, depositándolo en las hojas y tallos húmedos, dando inicio a la infección (Acuña *et al.*, 2019).

Los síntomas que muestra *Phytophthora infestans* son lesiones en hojas, tallos y peciolo que pueden causar la destrucción de la planta acompañado de un olor como a pudrición de follaje. Las lesiones comienzan con pequeñas manchas acuosas verdes oscuros, circulares a irregulares en las hojas basales cerca de las puntas o bordes de las hojas, si las condiciones climáticas son óptimas las lesiones se expanden rápidamente adquiriendo una coloración café oscuro a negro (Acuña *et al.*, 2019). En el fruto se muestra como manchas grandes, firmes y casi siempre hundidas con coloración de color dorado a marrón con anillos distintivos.

Para prevenir la enfermedad lo ideal es eliminar cualquier planta voluntaria de tomate, utilizar semillas certificadas, hacer uso de variedades resistentes al tizón tardío y utilizar fungicidas para reducir el impacto del hongo (Geuens *et al.*, 2024).

2.4.2 Tizón temprano (*Alternaria solani*)

El responsable de causar tizón temprano es causado por el hongo *Alternaria solani*, este patógeno sobrevive en restos de plantas infectadas que pueden estar en el suelo o en la superficie. La infección empieza cuando el hongo penetra la superficie de la hoja directamente a través de la epidermis, posteriormente las manchas comienzan a aparecer a los 2 – 3 días (Rueda & Shelton). Este hongo por lo general afecta la parte aérea de la planta y lo puede hacer en todas las fases de crecimiento fenológicas de las plantas, en plantas jóvenes presenta alteraciones extensas de color negro en el tallo, lo que puede provocar la muerte de las plantas (Nuñez & Sandoval, 2011). En plantas adultas produce manchas foliares color pardo a negro que se caracterizan por presentar anillos concéntricos y un halo amarillo alrededor, las manchas generalmente empiezan a aparecer en las hojas maduras que se encuentran en la parte baja de la planta (Nuñez & Sandoval, 2011). Los frutos también presentan síntomas, la infección comienza en la inserción del cáliz, mostrando anillos concéntricos cubiertos con una masa de esporas de color negro que provoca la caída del fruto ya sea verde o maduros (Obregón, 2018).



Figura 4. Sintomatología de *Alternaria solani* en follaje y en tallo de plantas de tomate (Obregón, 2018).

2.5 Enfermedades bacterianas en tomate

Las bacterias son microorganismos unicelulares invisibles para el ojo humano que parasitan a las plantas, de esta manera obtienen agua y nutrientes. Las bacterias son huéspedes obligados que obstruyen el sistema de conducción generando marchitamiento. Algunas de las bacterias que suelen afectar al cultivo de tomate son: *Ralstonia solanacearum* (marchitamiento bacteriano), *Pseudomonas corrugata*

(medula hueca), *Clavibacter michiganensis* (cancro bacteriano), *Xanthomonas spp.* (mancha bacteriana), *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* (Podredumbre blanda), entre otras (Flores *et al.*, 2012).

2.5.1 Cáncer bacteriano (*Clavibacter michiganensis* subsp *michiganensis*)

El cáncer bacteriano o también conocido como marchitez bacteriana es causada por el actinobacteria Gram positiva *Clavibacter*, es una de las enfermedades bacterianas más devastadoras para el tomate provocando pérdidas económicas al reducir la calidad y cantidad de cosecha (Chalupowicz *et al.*, 2017).

Es una enfermedad sistemática cuyos síntomas son áreas oleosas de color verde opaco entre las venas de las hojas que se secan rápidamente. Posteriormente, aparecen áreas necróticas de color marrón pálido (EPPO, 2016).

Las plantas de tomate son susceptibles a *Cmm* en todas sus etapas de crecimiento, incluyendo la floración y la formación de frutos, aunque no se han reportado infecciones en las flores. La colonización del fruto es clave para la propagación del patógeno, ya que *Cmm* puede ingresar por las semillas o a través de la superficie externa del fruto, favoreciendo su dispersión. El patógeno invade el pericarpio y puede llegar a la xilema del fruto, aunque el proceso exacto de propagación a través de los tejidos del fruto no está completamente claro (Wang *et al.*, 2022). La diseminación ocurre mediante el uso de semillas contaminadas, trasplantes contaminados, por el suelo, equipos y herramientas infestadas con *Cmm*.

Reducir el estrés de las plantas mediante el mantenimiento de una población óptima, nutrición adecuada, manejo de maleza y fertilidad también hace que las plantas sean menos propensas a enfermarse (Nandi *et al.*, 2018).

2.5.2 Necrosis de la médula del tomate (*Pseudomonas corrugata*)

Pseudomonas corrugata es una bacteria capaz de sobrevivir en plantas cultivadas o en el suelo. El tomate es sensible a esta bacteria que penetra a través de las heridas presentes en la raíces, corona y tallo, haciendo así la colonización de la solanácea. Cuando la planta ya está enferma no desarrolla su ápice y comienza a

mostrar folíolos rizados con clorosis. El tallo de la planta también muestra síntomas, pues la médula se afecta y por lo general son de color marrón oscuro o negro. En casos extremos la médula está degradada mostrando cavidades transversales limitadas o el colapso completo del tejido pardo (Figura 4) (INRAE, 2021).

El control de la necrosis de la médula del tomate suele ser complicado debido a que la bacteria se sitúa en el tejido interno, que no es muy accesible a la acción de antibióticos. Las recomendaciones para el manejo de la enfermedad se basan en adoptar prácticas culturales que ayudan a reducir la dispersión del patógeno (Nico *et al.*, 2006).



Figura 5. Necrosis de la médula del tomate *Pseudomonas corrugata*. A) Pudrición y reabsorción de la médula. B) Corte longitudinal de tallo enfermo (INRAE, 2021).

2.5.3 Costra bacteriana (*Xanthomonas campestris*)

La costra bacteriana provocada por *Xanthomonas campestris* tiene presencia en todo el mundo y afecta a cultivos de relevancia económica. El patógeno se desarrolla con temperaturas altas y humedad (Salas-Gómez., *et al* 2022). Los síntomas tienen presencia con pequeñas manchas o lesiones grasas, translúcidas que aparecen en los folíolos, conforme avanza la enfermedad se convertirán en manchas circulares o ligeramente angulares de color marrón a negro, con un diámetro de 2 – 3 mm (INRAE, 2021). Estas lesiones se pueden presentar en otras partes de la planta, particularmente pecíolo, tallo, sépalos que con frecuencia las

manchas pueden ser más extensas y alargadas en comparación con los folíolos (INRAE, 2021). Las manchas en los frutos se observan de manera irregular como costras ásperas, levantadas, de color marrón, que miden de 2-5 mm de diámetro (Tapia de la Barrera, 2023).

2.6 Enfermedades Causadas por virus en el cultivo del tomate

Solanum lycopersicum se ha convertido en uno de los cultivos más importantes y producidos en todo el mundo (Caruso *et al.*, 2020), por lo que la producción de él se ha vuelto indispensable. Las enfermedades virales son las principales limitantes para la producción de del tomate, estas limitan la producción, la calidad de fruto, la diversidad de las especies y la estabilidad de los ecosistemas (Rodríguez, Ortega, & Kassem, 2023). Se han reportado alrededor de 25 virus pertenecientes a nueve familias que afectan al tomate en México. Entre los virus de importancia económica están el virus del fruto rugoso marrón del tomate (ToBRFV), el virus del enrollamiento amarillo de la hoja del tomate (TYLCV), el virus de la marchitez del tomate (ToMarV), el virus del bronceado del tomate (TSWV) y el virus del mosaico del pepino dulce (PepMV), (García-Estrada *et al.*, 2022).

No todos los virus se pueden transmitir de la misma forma, existen virus que se transmiten por contacto, es decir, por el roce de una planta sana con otro infecta, por equipo y herramientas no desinfectadas o a través de vectores como trips (Rodríguez *et al.*, 2023).

2.7 Virus Rugoso Marrón del tomate causado por el *Tobamovirus*

fructirugosum

El *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV) puede generar pérdidas de entre el 30% y el 70% en los cultivos (EPPO, 2020). Este virus fue identificado por primera vez en 2014 en la provincia de Ohad, ubicado en el sur de Israel y es el resultado de una mutación en la recombinación genética con TMV, considerado el progenitor principal y ToMMV, progenitor secundario (Vásquez *et al.*, 2024). El *Tobamovirus fructirugosum* pertenece a la familia Virgaviridae y al género *Tobamovirus*, tuvo presencia en México en 2018 en cultivos de tomate y pimiento, se cree que la entrada del virus al país fue con la exportación de semillas contaminadas por este

virus (Rodríguez *et al.*, 2023). En México y en los países afectados, el *Tobamovirus fructirugosum* tuvo un gran impacto debido a la estabilidad de las partículas virales, así como la facilidad con la que se trasmite el virus (EPPO, 2020). Algunas herramientas que pueden facilitar su transmisión son los equipos, cuchillos, cuerdas de enredaje, los caminos de los tractores en campos abiertos y a través del agua circulante. Otra forma infectiva son las semillas que pueden conservar viable el virus durante años (EPPO, 2020).

Aunque no se han identificado vectores para *Tobamovirus fructirugosum* se ha visto que la transmisión del virus es posible a través de colonias de abejorros utilizados para utilizados para la polinización (EPPO, 2020).

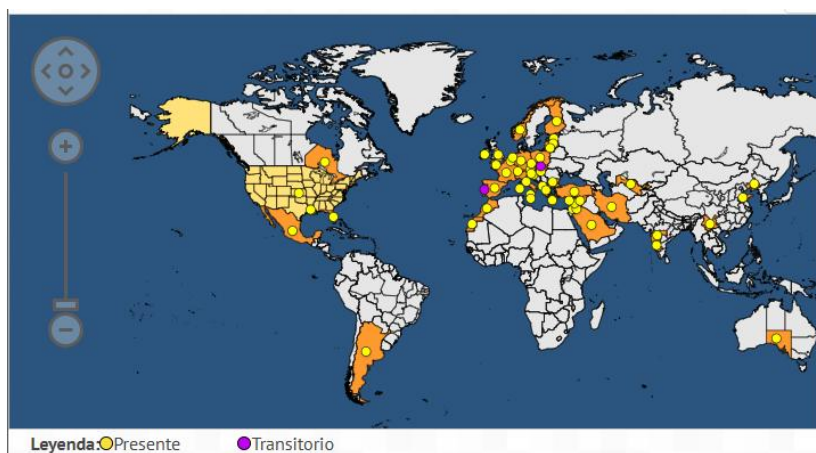


Figura 6. Distribución de *Tobamovirus fructirugoso* (EPPO, 2025).

2.7.1 Taxón del virus:

Reino: Virus y viroides

Categoría: Ribovirosis

Categoría: Orthornavirae

Filo: Kitrinoviricota

Clase: Alsuviricetes

Orden: Virus martelídicos

Familia: Virgaviridae

Género: *Tobamovirus*

Especie: *Tobamovirus*

fructirugosum (ToBRFV). EPPO, 2016)

2.7.2 Sintomatología de *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV)

La intensificación de los síntomas causados por el *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV), depende de la planta huésped, la estación, la temperatura, las condiciones de crecimiento y el estado fenológico de la planta en el momento de la infección (Vásquez, 2021). Los primeros síntomas se manifiestan en los brotes y en las hojas jóvenes donde se puede observar a menudo clorosis, patrón del mosaico y moteado. Las hojas jóvenes pueden estar arrugadas, fruncidas o deformadas y con ampollas, (EPPO, 2020).

En los frutos el virus provoca jaspeado, decoloración, deformación y necrosis de los frutos jóvenes (Panno *et al.*, 2020). La infección en floración impide el cuajado del fruto, pues el pedúnculo y cáliz suele volverse necróticos (Zhang, 2022).



Figura 7. Síntomas típicos inducidos por ToBRFV. A-B) Patrón de mosaico sistemático en hojas de plantas de tomate (Luria *et al.*, 2017).

Por desgracia no se puede utilizar ningún biosida para tratar las plantas afectadas. Las recomendaciones que se suelen dar para el manejo *del Tobamovirus fructirugosum* es poner restricciones al sitio y producción, eliminar los lotes de las

plantas afectadas, eliminar restos caídos. También, se recomiendan saneamientos y métodos físicos, después de tener algún punto de infección lo recomendable es la sanación y evitar el traslado de sustrato, soluciones de nutrientes, desinfectar ropa, herramientas, manos, equipos, etc (EPPO, 2020). Algunas otras estrategias que son utilizadas son variedades con resistencia, así como semillas certificadas.

2.8 Uso de nanopartículas en la agricultura

La creciente población mundial demanda cada vez más alimentos y producirlos se ha vuelto un desafío. El reto producir la mayor cantidad de alimentos aprovechando los recursos y cuidando en ecosistema (Lira-Saldivar, 2028)

La nanotecnología ha llegado como una potente solución al sector agroalimentario dado a la posibilidad incrementar la producción de alimentos utilizando menos insumos, reduciendo costos de producción e incluso minimizando el uso de agroquímicos. En los últimos años se ha apostado por la aplicación de las nanopartículas en los agroquímicos como lo son los nanopesticidas encapsulados que prometen mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental, los nanofertilizantes, elementos como Cu, Zn, Ag y Fe que se utilizan para promover el crecimiento de la planta y mejorar el uso de los nutrientes. La nanotecnología tiene tantas aplicaciones que incluso también se estudia el desarrollo de sensores que permiten detectar plagas y enfermedades en los cultivos (Lira-Saldivar, 2016)

2.9 Uso de nanotecnología para el control de virus

Aunque se han hecho pocos estudios de las nanopartículas para controlar enfermedades virales, los estudios recientes señalan que algunas nanopartículas se han visto eficientes para controlar las enfermedades de los virus en plantas. La aplicación de las manos post- infección reduce significativamente los síntomas y la cantidad de virus mejorando procesos bioquímicos y los sistemas de defensa involucrados. También se ha estudiado la aplicación de nanopartículas preinfección que mostraron efectos positivos al reducir la severidad de las enfermedades en plantas infectadas, efecto atribuido a la expresión de genes a moléculas

señalizadoras que ayudan a la activación de mecanismos de defensa (Carrillo-Lopez *et al.*, 2024)

Se ha observado que el uso de estas nanopartículas mejora el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como el rendimiento, calidad de los frutos y tubérculos. Las nanopartículas interactúan con las glicoproteínas virales, que evitan el reconocimiento del virus y su replicación (Carrillo-Lopez *et al.*, 2024).

Tabla 1. Estudios sobre el tratamiento de enfermedades virales en plantas con el uso de nanopartículas. (Carrillo-Lopez *et al.*, 2024).

Nanomaterial, tamaño y método de síntesis	Principales hallazgos
AgNPs, 77–92 nm, biosíntesis (cepas de <i>Bacillus</i> spp.).	Las AgNP sintetizadas a partir de <i>Bacillus liqueniformis</i> y aplicadas 24 h post-infección para el control del virus del mosaico amarillo del frijol) previnieron los síntomas destructivos causados por el virus en las hojas de haba (mosaico amarillo, moteado, arrugamiento, reducción de tamaño y deformación.
AgNPs comerciales (Sigma [®]).	La severidad de la enfermedad (virus del mosaico del tomate y virus Y de la papa) y el número de partículas virales disminuyeron en plantas de tomate con el uso de NPs; las NPs se unieron a la cubierta proteica de las partículas virales. Aumento de pigmentos fotosintéticos, proteína soluble total y actividad de peroxidasa y polifenol oxidasa en plantas tratadas.
AgNPs, 12,6 nm, biosíntesis (cepas bacterianas).	La aplicación de AgNPs 24 h post infección con el virus del bronceado del tomate disminuyó el número de lesiones locales en hojas de <i>C. amaranticolor</i> y papa. Menor efecto inhibitorio cuando la aplicación de AgNPs se realiza pre infección con el virus. Las AgNPs inducen resistencia sistémica y cambios tisulares (más tejido esponjoso, mayor grosor de las hojas y longitud del haz vascular).

Nanomaterial, tamaño y método de síntesis	Principales hallazgos
AgNPs, 12 nm, síntesis química.	La aplicación de AgNPs y ácido salicílico 24 h post-infección con el virus Y de la papa redujo la concentración del virus y el porcentaje de infección en papas, aumentó el número y tamaño de tubérculos, la altura de la planta y la cantidad de almidón y azúcares solubles.
Óxido de grafeno-AgNPs, 30–50 nm, síntesis química	Las AgNP aplicadas post-infección disminuyeron la concentración del virus, el porcentaje de infección, los síntomas y la severidad de la enfermedad en lechugas inoculadas con el virus del enanismo arbustivo del tomate.
ZnNPs, 100 nm, producto comercial	Se suprimieron los síntomas y la cantidad del virus del mosaico del pepino en berenjenas tratadas con ZnNPs, 2-nitrometilfenol y extracto de <i>Ascophyllum nodosum</i> , en condiciones de invernadero; ausencia de cubierta proteica en los virus de las plantas tratadas, mayor crecimiento, rendimiento y cantidad de fenoles totales y libres en las plantas tratadas.
ZnNPs, SiO ₂ NPs, 18–20 nm, síntesis química	La pulverización foliar diaria (preinfección) de NP en hojas de tabaco durante 12 días inhibió la replicación del virus del mosaico del tabaco debido a la activación de las defensas de la planta (acumulación de ROS, enzimas antioxidantes, expresión genética y fitohormonas).
Fe ₃ O ₄ NPs, biosíntesis (plantas)	Las nanopartículas se transportan y acumulan en <i>N. benthamiana</i> , impidiendo la propagación y proliferación del virus del mosaico del tabaco. Producción de ROS, aumento de la actividad antioxidante, expresión génica y síntesis de fitohormonas.
NP de CeO ₂	Las NP aplicadas in vitro a hojas de <i>Datura stramonium</i> y <i>N. tabacum</i> infectadas con el virus del mosaico del tabaco inhibieron el desarrollo de lesiones necróticas y la replicación viral.
TiO ₂ , 300–500 nm, síntesis química	Las plantas de haba tratadas con NPs (24 h pre-infección con el virus de la mancha del haba) presentaron una reducción en la severidad de la enfermedad y mayor crecimiento; se expresó el gen

Nanomaterial, tamaño y método de síntesis	Principales hallazgos
	regulador y de defensa involucrado en la vía de señalización del ácido salicílico.

3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Ubicación del experimento

El estudio se desarrolló en los invernaderos del Departamento de Parasitología en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el municipio de Saltillo, Coahuila, México.

3.2 Muestreo del material vegetativo

Para la muestra se recolectaron tallos, hojas de las plantas de tomate que mostraron los síntomas característicos del ToBRFV. La recolección del material vegetativo se realizó en tomate tipo Saladette en el municipio de Jonacatepec, Morelos durante el 2022. Una vez ubicadas las plantas con sintomatología aparente del ToBRFV, se confirmó la infección con las tiras inmunológicas de Agdia® para TMV. Las muestras se conservaron en bolsas etiquetadas y refrigeradas para su adecuado transporte y conservación.

3.3 Material vegetal

Las plantas de tomate utilizadas para el establecimiento del experimento, se sembraron en charolas de 240 cavidades utilizando peat most. Para el trasplante se utilizó una mezcla de peat most y perlita en relación 1:1. El riego fue programado cada 3 días y se llevó a cabo el seguimiento de las plantas con solución Steiner (1961). Posteriormente, a los 31 días, se trasplantaron las plántulas a bolsas de polietileno con peat most y perlita (relación 1:1) y se estableció el experimento.



Figura 8. Trasplante de plántulas. A) Preparación del sustrato. B) Siembra de plántula

3.4 Elaboración de la solución amortiguadora

El buffer de fosfato salino BPS (Phosphate Buffered Saline) es un amortiguador isotónico que tiene como principal objetivo mantener el pH y la presión osmótica lo más parecido al ambiente biológico natural. La solución se preparó siguiendo los pasos del protocolo PBS al 10x (Gilt, 2023).

Solución madre de PBS 10X: Se pesaron 80.6 g de NaCl, 2.2 g de KCl, 11.5 g de NaHPO₄, 2.0 g de KH₂HPO₄. En un vaso de precipitado, se agregaron las sales pesadas y se disolvieron en agua destilada hasta alcanzar el litro de agua. La mezcla se agitó en una plancha con barra magnética hasta la disolución de las sales.

Para la preparación PBS 1x: Se realizó una disolución de 1:10 a partir de la solución madre (1 L). Se tomaron 100 mL de la solución madre y se agregaron 900 mL de agua destilada. Por último, se ajustó el pH a 7.4 con HCL (ácido clorhídrico) o NaOH (Hidróxido de sodio) (Gilt, 2023).

3.5 Extracción del ToBRFV e inoculación del patógeno

Para la extracción del virus, se maceraron cinco gramos de hojas de tomate con sintomatología de *Tobamovirus fructirugosum* (ToBRFV). El macerado se realizó en un mortero de cerámica y se agregaron aproximadamente 10 mL de solución amortiguadora buffer, este proceso se realizó varias veces, finalmente se vació en un matraz.

La inoculación fue de manera mecánica. Se seleccionaron tres folíolos de tomate (uno de la parte apical y dos de la parte media de la planta), a los cuales se les espolvoreó carborundum (600 mallas) y se frotaron con un algodón empapado del macerado, facilitando la entrada del virus con las pequeñas heridas que dejaba el carborundo. Se repitió en cada uno de los tratamientos, excepto en el control negativo.



Figura 9. Preparación de inoculo en buffer tampón. (A) Macerado de hojas de tomate con presencia de (ToBRFV). B) maceración del material vegetal, (Aguilar, 2023).

3.6 Establecimiento de experimento en invernadero

Los tratamientos con nanopartículas que se aplicaron son: cobre, zinc, óxido de zinc y un tratamiento comercial. En total se realizaron tres aplicaciones, con un intervalo de 15 días entre cada una, siendo la primera aplicación a las 48 hr después de la inoculación de ToBRFV; la segunda, a los 15 días; y la tercera, a los 30 días después de la inoculación.



Figura 10. Distribución de plantas de tomate de acuerdo con los tratamientos

Durante el desarrollo del experimento, las plantas fueron regadas con la solución Steiner (1961). La concentración de la solución dependió del estado fenológico del cultivo desde el trasplante se aplicó al 25%, crecimiento vegetativo y aparición de botones florales 50%, floración y amarre de los frutos 75% y estaba estimado que para el relleno de los frutos se aplicará la solución al 100% (Roque, 2019).

Tabla 2. Tratamientos aplicados en la evaluación de invernadero.

Tratamiento	Nomenclatura	Concentración (ppm)
Testigo inoculado	Tes+ (control ToBRFV))	0
Oxido de zinc + ToBRFV	ZnO + ToBRFV	500
Np's de Producto Comercia (Exodusmax) + ToBRFV	NpPC + ToBRFV	500
Np's de Zinc + ToBRFV	NpZn + ToBRFV	500
Np's de Cobre + ToBRFV	NpCu + ToBRFV	500
Testigo sin inocular	Tes- (Control)	0

3.7 Variables a evaluar

Se determinó la severidad semanal de los síntomas expresados en cada planta, a partir de los cuales se desarrolló una escala de severidad para el *Tobamovirus fructirugosum* (Figura 11). También, se evaluaron los parámetros agronómicos clorofila total (SPAD), contenido de nitrógeno (N), altura de la planta (ALP), peso fresco foliar (PFF), longitud radicular (LR), peso fresco de raíz (PFR), grosor del tallo (GT) y número de racimos (NT).

A partir de los datos de severidad, se calculó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE), con la fórmula de Shaner y Finney (1977).

$$ABCPE = \sum_i \left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i)$$

Dónde: ABCPE es el área bajo la curva del progreso de la enfermedad y se refiere a la intensidad o severidad de la enfermedad, t es el tiempo de evaluación en ddi y n el número total de evaluaciones.

3.8 Análisis estadístico

Para cada variable evaluada (ABCPE, SPAD, N, ALP, PFF, LR, PFR, GT, NT) se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa del SAS versión 9.1

3.9 Extracción de ARN y amplificación por RT-PCR

Para la extracción de ARN se empleó el kit de extracción RNeasy Mini según las recomendaciones del fabricante. Realizando el macerado de las muestras de tejido infectado, utilizando 100 mg de tejido vegetal vivo. Posteriormente, se añadieron 450 μ L de Buffer RLo y RLC al máximo de 100 mg de tejido molido, y se mezcló en un vortex. El lisado se transfirió a una columna de giro QIAshredder (color lila), la cual se colocó en un tubo de recolección, se centrifugó a máxima velocidad durante 2 minutos. El sobrenadante obtenido se transfirió a un tubo de microcentrífuga, con cuidado de no perturbar la pastilla de residuos celulares, al cual se le añadieron 0.5 volúmenes de etanol (96-100%) al lisado, mezclando inmediatamente mediante pipeteo. La muestra de 650 μ L (incluyendo cualquier precipitado) fue transferida a una columna de centrifugado RNeasy Mini (color rosa), colocada en un tubo de recolección de 2 mL (suministrado). En seguida se centrifugó durante 15 segundos a $8000 \times g$ (equivalente a 210,000 rpm). A la columna de RNeasy se le añadieron 700 μ L de Buffer RW1 y se centrifugó durante 15 segundos a $28,000 \times g$. Posteriormente, se incorporaron 500 μ L de Buffer RPE a la columna RNeasy y se centrifugó durante 15 segundos a $8000 \times g$. Se añadió una nueva cantidad de 500 μ L de Buffer RPE a la columna RNeasy, se cerró la tapa y se centrifugó durante 2

minutos a $8000 \times g$. Finalmente, se colocó la columna de RNeasy en un tubo de recolección de 1.5 mL. Se añadieron entre 30 y 50 μL de agua libre de RNasa directamente sobre la membrana de la columna. Se centrifugó durante 1 minuto a $8000 \times g$ para eluir el ARN

La determinación del ToBRFV se realizó mediante la técnica de RT-PCR, siguiendo las recomendaciones del fabricante del kit AMPIGENE® qPCR 1-Step Green Kit Lo-Rox (Enzo®), para la mezcla de reacción se le añadieron 0.8 μL de primer F-3666 (5'-ATGGTACGAACGGCGGCAG-3') y 0.8 μL de primer R-4718 (5'-CAATCCTTGATGTGTITAGCAC-3') (Luria et al., 2017). El programa para la reacción del termociclador se modificó según las sugerencias del fabricante: transcripción 45°C, seguido de desnaturalización inicial a 95 °C por 2 min, 40 ciclos de desnaturalización 95 °C por 5 segundos, alineación 60-65 °C por 30 s, extensión 72°C por 30 s, y un ciclo de extensión final 72 °C por 10 min.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

Considerando la aparición de los síntomas según su desarrollo en la plantas de cada tratamiento (NpCu, NpPC, NoZn, ZnO, Testigo + y Testigo -) durante todo el desarrollo del experimento se estableció la siguiente escala de severidad Figura 11.

Descripción de escala propuesta

0: Planta sana, las plantas no mostraron síntomas de *Tobamovirus fructirugosum*.

1: Las hojas presentan una tonalidad verde-amarillenta pálida, especialmente en las hojas basales.

2: Se observan patrones irregulares de coloración en las hojas, con zonas de verde-amarillo y verde oscuro. Además, hay una disminución en el crecimiento de la planta.

3: Se presentan áreas elevadas o abultadas en la lámina foliar, acompañadas de una reducción en el crecimiento.

4: Se evidencia un estrechamiento del limbo foliar, junto con deformación y alargamiento, lo que conduce a una disminución del área fotosintética.

5: Las hojas muestran un enrollamiento o rizado.

6: Se aprecia una notable disminución en el crecimiento general de la planta.

7: Aparecen lesiones oscuras y secas, generalmente iniciándose en los bordes de la lámina foliar.

8: En la fase inicial, se observan áreas decoloradas o manchas de intensidad variable. En casos severos, estas lesiones pasan a manchas rugosas de color marrón.

9: Planta muerta



Figura 11. Propuesta de escala de severidad de ToBRFV para el cultivo del tomate. (Foto 8, Luria *et al.*, 2017)

Donde la aparición de síntomas comenzó a los 7 días después de la inoculación (ddi). Los primeros síntomas se observaron en el tratamiento NpCu y ZnO, donde se pudo observar la aparición de ligeras clorosis en la lámina foliar (nivel 1 de la escala de severidad propuesta, figura 10). A los 14 ddi, aproximadamente el 50%

de las plantas de los tratamientos inoculados ya presentaban síntomas que iban de ligeras clorosis a clorsis marcadas (niveles 1 o 2 de la escala).

A los 21 ddi, todos los tratamientos inoculados presentaban síntomas del virus (clorosis marcadas, ampollas y reduccion de lamina foliar) alcanzando niveles entre 2, 3 y 4 en la escala. Para la tercera semana (28 ddi), al menos el 50% de las plantas inoculadas en cada tratamiento mostraban síntomas como reducciòn de lamina foliar y enchinamiento. La severidad acumulada en los tratamientos puede ser observada en la tabla 3, donde el tratamiento NpCu + ToBREV es el que menor daño acumulado expreso (231.0 unidades, p -valor <0.0001)

Tabla 3. Progreso de la enfermedad en los diferentes tratamientos en la variedad Río Grande.

Tratamiento	ABCPE (madia $\pm$ D.E),
Tes+ (control ToBRFV))	266 $\pm$ 24.58 A
ZnO + ToBRFV	247.62 $\pm$ 15.75 AB
NpPC + ToBRFV	244.12 $\pm$ 10.45 AB
NpZn + ToBRFV	237.12 $\pm$ 7.76 AB
NpCu + ToBRFV	231 $\pm$ 17.382 B
Tes- (Control)	0.00 $\pm$ 0.00 C
p -valor	0.0001

Medias con letras iguales no muestran diferencias estadísticas significativas, con base en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ZnO: Óxido de zinc, NpCu: Nanopartículas de cobre, NpZn: Nanopartículas de zinc, NpPC: Nanopartículas de producto comercial, Testigo +: Plantas infectadas sin ningún tratamiento, Testigo -: Plantas sanas.

Dentro de los tratamientos evaluados, el uso de nanopartículas de cobre (NpCu) destaca como el más efectivo, ya que presenta una mayor reducción en el promedio de progresión de la enfermedad. Derbalah *et al.*, (2022) señalan que las nanopartículas de óxido de cobre aplicadas en plantas de calabaza inoculadas con ZYMV pueden reducir la severidad de la enfermedad hasta en un 88% en la tercera semana después de la inoculación. Además, mencionan que, cuando estas nanopartículas se aplican antes de la inoculación, inducen la activación de genes

de defensa y la producción de proteínas relacionadas con el patógeno, suprimiendo así los síntomas. Este mecanismo podría explicar el efecto positivo de las NpCu en la severidad del ToBRFV.

Por otro lado, el cobre desempeña un papel esencial en procesos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración, la desintoxicación de radicales superóxidos y la lignificación (Kyrkby & Römheld, 2007). Estas funciones podrían contribuir a la atenuación de los síntomas de la enfermedad.

De manera similar, el zinc juega un papel crucial en diversas funciones fisiológicas, como la actividad de la superóxido dismutasa, una enzima encargada de convertir los radicales superóxido en peróxido de hidrógeno (Cakmak, 2000). Cai *et al.* (2019) confirman que la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPZnO) induce una supresión directa del virus, atribuida a su interacción con las proteínas de la cubierta viral, lo que impide su entrada y replicación dentro de la planta.

Confirmación de la infección del ToBRFV en plantas de tomate

Cabe destacar que la infección de las plantas inoculadas fue confirmada mediante RT-PCR cuando las plantas alcanzaron al menos 30 días después de inoculación (ddi), obteniéndose un producto de 1052 pb (Figura 12), utilizando los primers F-3666 y R-4718, tal como indican (Luria *et al.*, 2017)

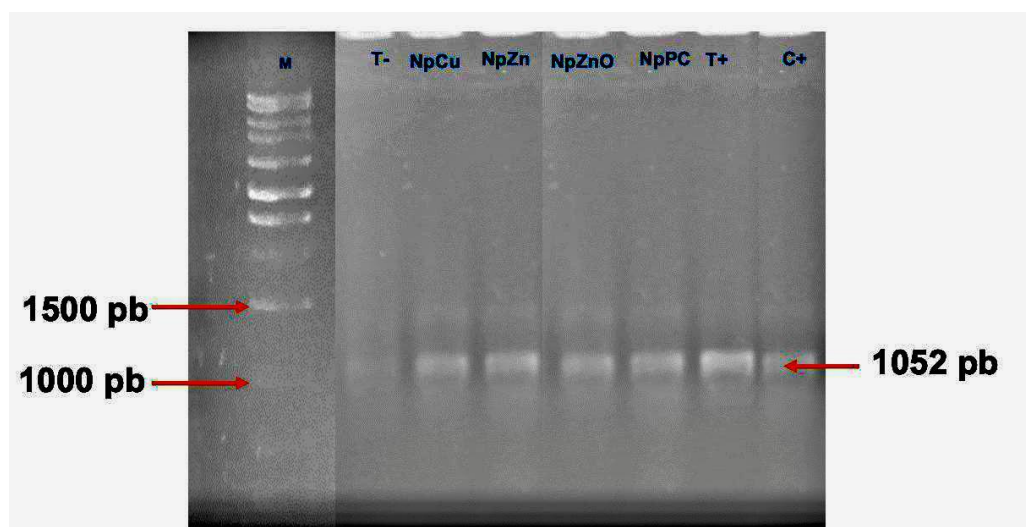


Figura 12. Gel de agarosa para la detección del ToBRFV.

M: Macerado de peso molecular ZnO: Óxido de zinc, NpCu: Nanopartículas de cobre, NpZn: Nanopartículas de zinc, NpPC: Nanopartículas de producto comercial, Testigo +: Plantas infectadas sin ningún tratamiento, Testigo -: Plantas sanas, C+: Control positivo.

Tabla 4. Efecto de los tratamientos en las variables agronómicas en plantas inoculadas con el *Tobamovirus fructirugosum*

Tratamiento	Variables agronomicas (media $\pm$ D.E.)						
	SPAD	PFT	GT	LR	PFR	NR	ALP
Tes+ (control ToBRFV)	13.95 $\pm$ 0.45 C	75.25 $\pm$ 23.47 B	5.125 $\pm$ 0.56 B	26.62 $\pm$ 11.11 B	11.5 $\pm$ 1.29 AB	2.5 $\pm$ 1.29 B	82.58 $\pm$ 21.85 AB
ZnO + ToBRFV	23.46 $\pm$ 0.80AB	116 $\pm$ 64.42 B	6.27 $\pm$ 2.31 BA	37.025 $\pm$ 6.17 B	13.625 $\pm$ 5.13 AB	3.50 $\pm$ 1.29 B	77.90 $\pm$ 10.96 B
NpPC + ToBRFV	21.43 $\pm$ 3.99 B	73.25 $\pm$ 21.26 B	5.23 $\pm$ 0.65 B	24.52 $\pm$ 7.90 B	10.37 $\pm$ 2.13 B	3 $\pm$ 0.81 B	82.33 $\pm$ 21.85 AB
NpZn + ToBRFV	22.46 $\pm$ 2.99 B	97.25 $\pm$ 19.97 B	5.34 $\pm$ 0.55 B	37 $\pm$ 8.04 B	15.12 $\pm$ 6.48 AB	2.5 $\pm$ 1.914 B	87.75 $\pm$ 15.38 AB
NpCu + ToBRFV	23.33 $\pm$ 1.04 AB	105.25 $\pm$ 18.83 B	4.63 $\pm$ 0.55 B	39.75 $\pm$ 6.70 B	14 $\pm$ 4.08 AB	4.25 $\pm$ 1.25 BA	96.95 $\pm$ 17.04 AB
Tes- (Control)	29.36 $\pm$ 2.45 A	313.75 $\pm$ 146.759 A	8.09 $\pm$ 1.00 A	59.75 $\pm$ 10.07 A	21 $\pm$ 4.54 A	7.5 $\pm$ 2.64 A	122.73 $\pm$ 20.739 A
p-valor	0.0001	0.0007	0.0054	0.0002	0.0397	0.0036	0.0299

Medias con letras iguales en cada columna no muestran diferencias estadísticas significativas, con base en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ZnO: Óxido de zinc, NpCu: Nanopartículas de cobre, NpZn: Nanopartículas de zinc, NpPC: Nanopartículas de producto comercial, Testigo +: Plantas infectadas sin ningún tratamiento, Testigo -: Plantas sanas.

Las unidades SPAD es un indicador de la cantidad relativa de clorofila en las hojas (Konica Minolta, 2009). De acuerdo con los datos, se encontró un valor de $p < 0.0001$, lo que confirma una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de clorofila entre los tratamientos evaluados.

Los demás tratamientos exhibieron un efecto de amortiguación frente a la infección por ToBRFV (Testigo+), destacando los tratamientos con óxido de zinc y nanopartículas de cobre, que mostraron valores promedio de 23.46 y 23.33 en

SPAD, respectivamente. Dichos valores representan incrementos de 9.51 y 9.38 unidades SPAD en relación con el testigo inoculado (Testigo+), lo que se refleja en una mayor producción o conservación de clorofila.

El efecto antes mencionado concuerda con lo reportado por Sofy *et al.* (2021), quienes informaron que plantas de tomate infectadas con ToMV y tratadas con nanopartículas de ZnO incrementaron su nivel de SPAD entre un 20.62% y 38.10% en comparación con los testigos inoculados. El posible mecanismo involucra una reducción de la carga viral, lo cual evita la degradación de la clorofila y promueve las reacciones fotosintéticas. Dichas nanopartículas metálicas pueden interactuar con el Fotosistema II, estabilizándolo y otorgándole propiedades similares a un “dispositivo fotosintético artificial”.

Asimismo, Liu *et al.* (2024) mostraron que el óxido cúprico (CuO) actúa con efecto virucida y eleva aproximadamente un 30% el nivel de clorofila en comparación con el control, reafirmando el potencial de las nanopartículas metálicas, tanto de ZnO como de CuO, para contrarrestar las infecciones virales y conservar la funcionalidad fotosintética en las plantas.

En cuanto a la variable PFR los resultados muestran; que aunque no se detectaron diferencias estadísticas en el PFR (ZnO, NpCu, NpZn, Test + y Test -), siendo el NpPC el único tratamiento estadísticamente diferente. Se observó un incremento del 54, 40 y 30% respecto al control positivo en los tratamientos con ZnO, NpCu y NpZn, respectivamente, destacando ZnO y NpCu. Rivero (2023) señala que el óxido de zinc aumenta el número de hojas y la altura de la planta, mientras que Cai *et al.* (2019) reporta que la aplicación de NpZnO en plantas de tomate infectadas con TMV incrementa el peso fresco en un 17.29% y el peso seco en un 63.33%. Este comportamiento se le atribuye a la inactivación del virus, el aumento de ROS que limita la infección y la inducción de respuestas de defensa con la activación de genes PR y elevación de hormonas protectoras y que a su vez tienen impacto en el desarrollo de la planta.

Por su parte, el cobre es un micronutriente esencial que participa en procesos fotosintéticos y metabólicos, mejorando la resistencia de las plantas a enfermedades (Kyrkby & Römheld, 2007), lo que explica el mayor peso fresco observado en el tratamiento con NpCu. Coincidiendo con ello, Liu *et al.* (2024) encontró que la aplicación de NpCuO en 100 mg/L promueve en el peso fresco en tabaco (*Nicotiana benthamiana*). Por otro lado, el tratamiento con menor PFR fue NpPC, que incluso mostró una reducción del 49.38 % del PFR en comparación del testigo positivo, lo que indica que el tratamiento con NpPC no ejerce un control efectivo sobre el desarrollo de la enfermedad.

En cuanto a la variable de grosor del tallo, el tratamiento testigo negativo obtuvo una media de 8.097 mm, siendo este el estado óptimo de la planta. El tratamiento de Np ZnO fueron estadísticamente similares al testigo sin inocular (6.27 mm). Cabe señalar que el tratamiento de las NpCu, registró una reducción en el grosor de tallo del 43.13%, figurando con una media menor a la registrada por el testigo inoculado (4.6 mm). En esta variable agronómica, Rivero (2023) encontró que las NpZnO a concentraciones de 100 mM y 1000 mM aumentaron el diámetro del tallo de 1.10 a 1.22 veces; cabe señalar que en esta investigación el GT por ZnO incremento un 20 % el GT en comparación con control inoculado. Rivero (2023) reporta que el aumento en número de hojas en comparación con el control, con lo que sugiere que el óxido de zinc tiene un efecto de disminución de los síntomas ante el virus PHYVV en Chile, a través de la disminución de la carga viral e incluso mejora las características biológicas y morfológicas en comparación con plantas sanas.

La altura de la planta mostró mejoría en algunos tratamientos en comparación con el testigo positivo, registrando incrementos de 78.9% con NpCu y 71.4% con NpZn. Según Juárez-Maldonado *et al.*, (2023), la aplicación foliar de nanopartículas de NpCu mejora la absorción de nutrientes esenciales, lo que incrementa la actividad fotosintética y la síntesis de clorofila; en consecuencia, se favorece un crecimiento general de la planta que se traduce en mayor altura. Este resultado coincide con lo observado por Rivero (2023) en plantas de Chile jalapeño tratadas con NpZnO e inoculadas con PHYVV, las cuales alcanzaron una altura 1.1 veces superior al

control. Por su parte, Yruela (2005) destaca que cuando el cobre está disponible en cantidades adecuadas, se mejora la transferencia de electrones en la cadena fotosintética y se potencia la actividad enzimática, lo que promueve un crecimiento vegetativo más robusto. Liu *et al.* (2024) aplicó CuO y NpCuO en pulverizaciones sobre las hojas de la planta de tabaco, en los resultados no observó un efecto significativo en la altura de las plantas al aplicar óxido de cobre (CuO). no obstante, sí reportaron beneficios en otros indicadores fisiológicos, como el incremento en el peso fresco, peso seco y contenido de clorofila, lo que podría deberse a las concetaciones de las nanopartículas.

En cuanto a la longitud de raíz, aunque no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo inoculado, se observó un incremento del 38-49% en algunos casos. Sin embargo, es importante señalar que Cai *et al.* (2019) y Rivero (2023), evaluaron el largo radicular y no encontraron un aumento en la longitud radicular tras la aplicación de nanopartículas de ZnO ($100 \mu\text{g mL}^{-1}$) y ZnO (100 mM) por lo que sugieren que la posibilidad de inhibición de crecimiento radicular puede estar relacionada con la acumulación de la Np así como al posible estrés oxidativo inducido por las mismas. Rivero (2023), concluye que la respuesta a la aplicación de nanopartículas depende de la especie vegetal, la concentración y el tiempo de exposición, lo que explica la variabilidad observada en este estudio. Además, se destaca que el tratamiento con NpCu mostró el mayor incremento en la variable, mientras que NpPC registró el menor, sugiriendo que esta última formulación podría incluso favorecer el desarrollo de la enfermedad.

El ANOVA mostró que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos respecto al peso fresco de raíz (PFR). Sin embargo, los tratamientos con NpZn y NpCu mostraron tendencias que sugieren un potencial investigativo con un aumento de 56.67% y el 50% respectivamente. Adhikari *et al.* (2016) subraya la importancia del cobre como un micronutriente esencial que regula positivamente la actividad enzimática, lo cual podría influir en la salud radicular y Juárez-Maldonado *et al.*, (2023) reportan un aumento en la biomasa radicular del 10.4% respecto al testigo absoluto al aplicar NpCu ($0.006 \text{ mg nCu L}^{-1}$), Cai *et al.* (2019) también

reporta aumento en la masa radículas con ZnO ($100 \mu\text{g mL}^{-1}$) al aplicarlas en plantas inoculadas con (TMV).

En cuanto a la variable NR, en el tratamiento NpCu no presenta diferencias estadísticas significativas en comparación con el Test -; sin embargo, se observan mejoras en el rendimiento de los tratamientos aplicados. En términos porcentuales, las NpCu mostraron un rendimiento del 56.67% en comparación con el test -; mientras que testigo inoculado presento una reducción del 66.67 %. El tratamiento con óxido de zinc (ZnO) registró una reducción del 46.67%, mientras que las NpPC registraron una disminución del 40% en el NR. Liu *et al.* (2024) reporta que la aplicación de CuONPs en *Nicotiana benthamiana* impide la replicación del virus TMV, disminuyendo la carga viral en la planta y por ende se ven disminuidos los síntomas asociados al virus, provocando menos estrés en la planta y posiblemente el aumento en el número de racimos.

Rivero (2023), encontró que algunas variedades de chile jalapeño inoculadas con PHYVV y con tratamiento de ZnO incrementaron la floración hasta 1.36 comparado con el control.

5 CONCLUSIONES

Los tratamientos mostraron ser efectivos en cuanto a la reducción de la severidad del *Tobamovirus fructirugosum* 6.9-13.16 %, siendo el tratamiento NpCu el que mostró la mayor eficiencia en el control de la enfermedad. Los tratamientos con óxido de zinc y nanopartículas de cobre mostraron incrementos en las variables como el número de racimos y el peso fresco, sugiriendo un potencial para estudios futuros con variaciones en concentraciones y métodos de aplicación. Dado el comportamiento observado de las nanopartículas de cobre durante el estudio y la falta de investigaciones previas que evalúen su influencia en la resistencia del cultivo, es crucial profundizar en el estudio de su efecto en las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, I., Bravo, R. G., Muñoz, M., Olivares, R., Sagredo, B., Sandoval, C., . . . Gatica, J. (2019). Tizón tardío de la papa: Estrategias de Manejo Integrado con Alertas Temprana. Obtenido de INIA: 2(1) 22 <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6777/Bolet%c3%adn%20INIA%20N%c2%b0%20399?sequence=1&isAllowed=y>
- Adhikari, T., Sarkar, D., Mashayekhi, H. and Xing, B. (2016). Growth and enzymatic activity of maize (*Zea mays* L.) plant: solution culture test for copper dioxide nano particles. *Journal of Plant Nutrition*. 39(1): 99-115
- Agudelo, D. A., & Polanco Puerta, M. F. (2019). Evaluación del bioestimulante foliar (bioagro triple a) en la producción de tomate tipo chonto (*Lycopersicum esculentum* Mill) en dos ambientes de cultivo. *Agricolae & Habitat*, 2(2), 1-18. <https://doi.org/10.22490/26653176.3423>
- Aguilar G. A. C. (2023). *Efecto de la aplicación de fosfitos en el comportamiento de Solanum lycopersicum L. inoculado con virus marrón del tomate (ToBRFV) bajo condiciones de invernadero* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional UAAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/49188/K%2068560%20Aguilar%20Garc%c3%ada%2c%20Alexandro%20Constantino.pdf>
- Barranco, V. (2003). Dípteros de interés agronómico. Obtenido de Agromicidos plaga de cultivos hortícolas intensivos. 5(33) 293 – 307 http://sea-entomologia.org/PDF/BOLETIN_33/B33-054-293.pdf
- Bedford, I. D. (2020). *Mosquita blanca Bemisia tabaci Gennadius (Hemiptera: Aleyrodidae)*. CABI. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/600965/Mosquita_blanca.pdf

- Benavides-Mendoza, A., Figueroa, R., Mendoza, C., & Ramírez, H. (2016). *Cu nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato*. Journal of Nanomaterials, 2016, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2016/7630354>
- Blancar, D., Laterrot, H., Marchoux, G., & Candresse, T. (2011). Enfermedades del tomate: Identificar, conocer, controlar. Ediciones Mundi-Prensa.
- Bustillo, A. E. (1983). Las plagas del tomate y su control. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/21223>.
- Cabildo Tenerife. Servicio Técnico y Desarrollo Rural Área de Aguas y Agricultura. En línea: http://www.agrocabildo.com/publica/Publicaciones/toma_266_L_hdtuta.pdf
- Cai, L., Liu, C., Fan, G., and Liu, C., and Sun, X. (2019). Preventing viral disease by ZnONPs through directly deactivating TMV and activating the plant immunity in *Nicotiana benthamiana*. Environ. Sci. Nano., 6, 3653–3669.
- Cakmak, I. (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. New *Phytologist*, 146(2), 185–205. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>
- Cambrón-Crisantos, José Manuel, Rodríguez-Mendoza, Johan, Valencia-Luna, Jessica Berenice, Alcasio Rangel, Salomé, García-Ávila, Clemente de Jesús, López-Buenfil, José Abel, & Ochoa-Martínez, Daniel Leobardo. (2019). Primer reporte de Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) en Michoacán, México. Revista mexicana de fitopatología, 37(1), 185-192. Epub 21 de agosto de 2020. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1810-5>
- Carrillo-Lopez, L. M., Villanueva-Verduzco, C., Villanueva-Sánchez, E., Fajardo-Franco, M. L., Aguilar-Tlatelpa, M., Ventura-Aguilar, R. I., & Soto-Hernández, R. M. (2024). Nanomaterials for Plant Disease Diagnosis and Treatment: A Review. Plants, 13(18), 2634. <https://doi.org/10.3390/plants13182634>

- Castillo Carrillo, C. I., & Llumiquinga Hormaza, P. J. (2021). Manual para reconocer e identificar al psílido de la papa (*Bactericera cockerelli* Šulc), en campo y laboratorio (Manual técnico No. 121, 40 pp.). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Chalupowicz, L., Barash, I., Reuven, M., Dror, O., Sharabani, G., Gartemann, K. H., Eichenlaub, R., Sessa, G., & Manulis-Sasson, S. (2017). Differential contribution of *Clavibacter michiganensis* ssp. *michiganensis* virulence factors to systemic and local infection in tomato. *Molecular plant pathology*, 18(3), 336–346. <https://doi.org/10.1111/mpp.12400>
- Cuesta, X., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Racines, M., & Castillo, C. (2021). *Guía de manejo de la punta morada de la papa* (2ª ed., Manual técnico No. 104). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. https://www.researchgate.net/profile/Carmen-Castillo-Carrillo/publication/374380697_Guia_manejo_punta_morada_de_la_papa/links/651acbb1b0df2f20a2081573/Guia-manejo-punta-morada-de-la-papa.pdf
- Délices, G., Leyva Ovalle, O. R., Mota-Vargas, C., Núñez Pastrana, R., Gámez Pastrana, R., Meza, P. A., & Serna-Lagunes, R. (2019). Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme* (*Solanaceae*) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México). *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 1023-1041. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i4.33754>
- Derbalah, A. S., Abdelsalam, I., Behiry, S. I., Abdelkhalek, A., Abdelfatah, M. M. S., Ismail, S., & Elsharkawy, M. M. (2022). Copper oxide nanostructures as a potential method for control of zucchini yellow mosaic virus in squash. *Pest Management Science*, 78(6), 3485–3498. <https://doi.org/10.1002/ps.7001>
- Díaz, J., Lozoya, Hector, Sahagún, J., & Peña, A. (2014). The Pathosystem *Solanum tuberosum* L.-*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary in Chapingo, Mexico. 51 91,312–326. Obtenido de Revista estadounidense de investigación de la papa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12230-013-9351>

Dirección General de Sanidad Vegetal & Dirección del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria. (2021). *Liriomyza* spp. (*L. huidobrensis*, *L. sativae*, *L. trifolii*) (Diptera: Agromyzidae): Minador de la hoja del frijol. Ficha técnica. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/635232/Minador de la hoja del frijol.PDF](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/635232/Minador_de_la_hoja_del_frijol.PDF)

Dirección General de Sanidad Vegetal, & Dirección del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria. (2020). *Ficha técnica: Mosquita blanca (Bemisia tabaci Gennadius, Hemiptera: Aleyrodidae).* CABI. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/600965/Mosquita blanca.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/600965/Mosquita_blanca.pdf) doi: 10.1039/C9EN00850K

EPPO Global Database. (1966). *Solanum lycopersicum (LYPES)*. European and Mediterranean Plant Protection Organization. Recuperado el [fecha de acceso], de <https://gd.eppo.int/taxon/LYPES>

EPPO Global Database. (2016). *Tobamovirus fructirugosum (TOBRFV)*. European and Mediterranean Plant Protection Organization. Recuperado el [fecha de acceso], de <https://gd.eppo.int/taxon/TOBRFV>

EPPO. (2016). *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 46(2), 202–225. <https://doi.org/10.1111/epp.12302>

Escobar, H., & Lee, R. (2009). Manual de producción de tomate bajo invernadero (2ª ed.). Google Books. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=6QZHEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=descripci%C3%B3n+botanica+de+tomate&ots=JmDm0cZtEp&sig=FQQ8a6PAJO5Z7n3-3Ug80Q50kJg#v=onepage&q&f=false>

Estay, P. (2018). Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades. Obtenido de INIA: 11-15. https://web.inia.cl/mateo/files/2018/09/FICHA_INIA_08.pdf

Fidecomisos Institucionales en Relación con la Agricultura. 2019. Panorama Agroalimentario. Fidecomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. [en línea]

<https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf>

Flores, C., Buono, S., & Giorgini, S. (2012). Enfermedades de tomate: Guía de consulta (1a ed.). Ediciones INTA. <https://www.manualfitosanitario.com/InfoNews/GuiaConsultaEnfermedadesTomateWeb.pdf>

Fornaris, G. J. (2007). *Conjunto tecnológico para la producción de tomate de ensalada* (Publicación 166). Estación Experimental Agrícola, Universidad de Puerto Rico.

García-Estrada, R. S., Díaz-Lara, A., Aguilar-Molina, V. H., & Tovar-Pedraza, J. M. (2022). Viruses of Economic Impact on Tomato Crops in Mexico: From Diagnosis to Management-A Review. *Viruses*, 14(6), 1251. <https://doi.org/10.3390/v14061251>

Gevens, A., Seidl, A., & Hudelson, B. (2024, March 1). *Tizón tardío* (Late blight). Wisconsin Horticulture. <https://hort.extension.wisc.edu/articles/tizon-tardio/>

Gil M. (2023). Buffer de fosfato (PBS). Lifeder: <https://www.lifeder.com/buffer-fosfatos/>
https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/fieldattached-file/pdf-manual_produccion_de_tomate_-_pag.-_web.pdf

INRAE. (2021). *Xanthomonas spp.* Costra bacterina. Obtenido de Ephytia: <http://ephytia.inra.fr/es/C/5043/Tomate-Xanthomonas-vesicatoria-Costrabacte>

Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, la Alimentación y el Medio Ambiente (INRAE). (2021). *Pseudomonas corrugata* Roberts y Scarlett (1981): Médula negra. Ephytia. <https://ephytia.inra.fr/es/C/5046/Tomate-Pseudomonas-corrugata-Medula-negra>

Konica minolta, 2009. https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/452/SPAD-502Plus_ES.pdf

- Kyrkby, E., & Römheld, V. (2007). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Proceedings 543, The International Fertilizer Society*. York, Reino Unido.
- Lira Saldivar, Ricardo Hugo, Méndez Argüello, Bulmaro, Santos Villarreal, Gladys De los, & Vera Reyes, Ileana. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Liriomyza spp. (2020). Epistando diagnóstico. EPPO Standards on Diagnostics, 53(2), 1-5. <https://doi.org/10.1111/epp.12832>
- Liu, S., Tian, W., Liu, Z., Wei, X., Yuan, K., Du, W., Chen, S., Chen, S., Zhou, D., & Cai, L. (2024). Biosynthesis of cupric oxide nanoparticles: Its antiviral activities against TMV by directly destroying virion and inducing plant resistance. *Phytopathology Research*, 6, 30. <https://doi.org/10.1186/s42483-024-00250-z>
- López Marín, L. M. (2021). Manual de enfermedades pre y poscosecha en tomate (*Solanum lycopersicum*) (p. 32). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). https://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2021/MANUAL%20DE%20ENFERMEDADES%20POSCOSECHA_min_ed.pdf
- Luria N, Smith E, Sela N, et al. (2017) A new Israeli Tobamovirus Isolate Infects Tomato Plants Harboring Tm-2 Resistance Genes. *PLoS One* 12: e01704. Doi: 10.1371/journal.pone.0170429
- Memorias del Curso Taller Sobre la Palomilla del Tomate (*Tuta absoluta*). Camayagua, Honduras
- Monserat, D. La palomilla del tomate *Tuta absoluta* en la región de Murcia: bases para su control, Consejería de Agricultura y Agua, Murcia, España, 2008
- Morales A., R. A., Atencio A., F. A., Lara M., J. A., & Muñoz, J. A. (1994). *La mosquita minador (Liriomyza spp.) en Panamá* (Monografía No. 1). Instituto de Investigación de Panamá.

- Moreña, J., Rodríguez, V., Zapata, M., A., Miriam. (2006). Cultivo de tomate bajo invernadero.
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1224/43125_50546.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Muñoz, M (1995). Desarrollo de ventajas competitivas en la agricultura: el caso del tomate rojo. Universidad de texas: Universidad Autónoma de Chapingo 148-152
- Nandi, M., Macdonald, J., Liu, P., Weselowski, B., & Yuan, Z. C. (2018). *Clavibacter michiganensis ssp. michiganensis*: bacterial canker of tomato, molecular interactions and disease management. Molecular plant pathology, 19(8), 2036–2050. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/mpp.12678>
- Nico, A. I., A. M. Alippi, E. Dal Bo & L. B. Ronco. 2006. Interacción de *Pseudomonas corrugata* y *Pseudomonas viridiflava* y diferentes genotipos de tomate. Rev. Fac. Agron. 106 (1): 37-45.
- Nolasco-García, L. I., Marín-León, J. L., Ruiz-Nieto, J. E., & Hernández-Ruíz, J. (2020). Métodos de identificación del virus de la fruta rugosa marrón del tomate (ToBRFV) en México. Agronomía Mesoamericana. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.40655>
- Nuñez, F., & Sandoval, C. (2011). Biología de la Enfermedad del Tizón Temprano. Obtenido de INIA: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6552/NR40565.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Obregón, V. (2018). Guía para la Identificación de las Enfermedades de Tomate en Invernadero. Obtenido de INIA: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_guia_para_la_identificacion_de_enfermedades_de_tomate_en_invernadero.pdf
- Panno, S., Caruso, A. G., Barone, S., Lo Bosco, G., Rangel, E. A., & Davino, S. (2020). Spread of Tomato Brown Rugose Fruit Virus in Sicily and Evaluation of the Spatiotemporal Dispersion in Experimental Conditions. Agronomy, 10(6), 834. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060834>

- Pérez-López, E., Iturbide Hernández, D. de J., Muraira-Soto, M., Panuncio Mora-Solís, R., & Aguirre-Alonso, R. O. (2023). Producción de tomate saladette (*Lycopersicum esculentum* Mill.) con micorrizas y biol en la cuenca del Papaloapan. Memoria de congreso: Congreso de Investigación en Ciencia e Innovación de tecnologías Productivas. https://www.cdaltamirano.tecnm.mx/images/documentos/vi_congreso/Tecnm_01_Pérez-López_et_al.%202023.pdf
- Polston, J. E.; De Barro, P. and Boykin, L. M. (2014). Transmission specificities of plant viruses with the newly identified species of the *Bemisia tabaci* species complex. Pest Management Science, 70(10), 1547–1552
- Revista Claridades Agropecuarias, ASERCA. 1998. Número 62, Octubre de 1998, Revista Mensual publicada por la Dirección General de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/jitomate-mexicano-entre-los-cinco-principales-productos-agricolas-generadores-de-divisas-agricultura>
- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59(9), 3485–3498. <https://doi.org/10.1021/jf104517j>
- Rivero Montejó, S. D. (2023). Evaluación del impacto de nanopartículas de óxido de zinc en el crecimiento y respuesta antiviral en *Capsicum annum*. *Revista de Nanotecnología Agrícola*, 12(1), 55-78.)
- Roque, E. A. (2019). Efecto de fosfitos como inductores en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Inoculadas con *Candidatus Liberibacter solanacearum*. Tesis de Maestría.
- Rueda, A., & Shelton, A. (2018). Tizón temprano del Tomate. Obtenido de Entomology: <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/43271/early-blightpotatoes-FS-NYSIPM.pdf?>

- Salas, A. L., Osorio, E., Espinoza, C. A., Rodríguez, R., Segura, M. T. J., Neri, E., & Estrada, B. (2022). Principales enfermedades del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de campo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 4190. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1793
- Santos, B., Perera, S. (2010). Medidas de control de la Palomilla del tomate (*Tuta absoluta*).
- Schuster DJ, Stansly PA, Polston JE. 1996. Expressions of plant damage of *Bemisia*. p. 153-165. En: Gerling D, Mayer RT. (eds.). *Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management*. Intercept Andover, Hants. Reino Unido
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Jitomate mexicano, entre los cinco principales productos agrícolas generadores de divisas: Agricultura. Gobierno de México.
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. 2019. ¿Conoces el virus rugoso del tomate? Secretaria de Desarrollo Rural. [en línea]<https://www.gob.mx/agricultura/zacatecas/articulos/conoces-el-virus-rugoso-del-tomate-227518?idiom=es>
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. 2022. México, referente mundial en el cultivo y exportación de jitomate: Agricultura.<https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-referente-mundial-en-el-cultivo-y-exportacion-de-jitomate-agricultura>
- Semaan Lince, S. (2025). Manual de producción de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) bajo condiciones de invernadero. Universidad Autónoma de Querétaro. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/7234>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2017. Tomate rojo o jitomate: ¿Cómo lo llaman donde radica?, [en línea] <https://www.gob.mx/siap/articulos/tomate-rojo-o-jitomate-como-lo-llaman-donde-radicas>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2024. Escenario mensual de productos agroalimentarios. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938464/Jitomate_Julio.pdf

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2013). Palomilla del tomate *Tuta absoluta* Meyrick (1ra ed.). <https://cesavenay.org.mx/wp-content/uploads/Fichas-Tecnicas-Plagas-VEF/FTNo28Palomilladel tomate.pdf>

Sirtori, G., & Baffeli, E. (2020). *Los tomates*. De Vecchi, S. A.

Sistema Integral de Vigilancia Control Fitosanitario Forestal. (2007). *Bemisia tabaci*. https://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/08%20Gu%C3%ADas%20de%20s%C3%ADntomas%20y%20da%C3%B1os/Gu%C3%ADas%20de%20s%C3%ADntomas%20y%20da%C3%B1os%20nativas/Bemisia%20tabaci_Version%20Larga.pdf

Sofy, A. R., Sofy, M. R., Hmed, A. A., Dawoud, R. A., Alnaggar, A. E.-A. M., Soliman, A. M., & El-DougDoug, N. K. (2021). Ameliorating the Adverse Effects of *Tomato mosaic tobamovirus* Infecting Tomato Plants in Egypt by Boosting Immunity in Tomato Plants Using Zinc Oxide Nanoparticles. *Molecules*, 26(5), 1337. <https://doi.org/10.3390/molecules26051337>

Steiner, A. A. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and soil*. 1961, 15(2), 134-154. available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01347224>

Tapia-de la Barrera, Laura Belén, Báez-Sañudo, Manuel Alonzo, García-Estrada, Raymundo Saúl, Tovar-Pedraza, Juan Manuel, & Carrillo-Fasio, José Armando. (2023). Identificación de especies y razas fisiológicas de *Xanthomonas* aisladas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y chile (*Capsicum annuum*) en Sinaloa, México. *Revista mexicana de fitopatología*, 41(3), 326-342. Epub 13 de octubre de 2023. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2210-2>

Vidal, G. L. (2018). Resistencia a diamidas, spinosad e indoxacarb en *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de

Cartagena). Universidad Politécnica de Cartagena.
<https://pdfs.semanticscholar.org/a752/2db36abc339ca4c991f915ba21588a48288c.pdf>

Vidal, G. L. (2018). Resistencia a diamidas, spinosad e indoxacarb en Tuta absoluta (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) (Tesis de maestría o doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena). Universidad Politécnica de Cartagena.
<https://pdfs.semanticscholar.org/a752/2db36abc339ca4c991f915ba21588a48288c.pdf>

Wang, Y., Deng, S., Li, Z., & Yang, W. (2022). Advances in the Characterization of the Mechanism Underlying Bacterial Canker Development and Tomato Plant Resistance. *Horticulturae*, 8(3), 209. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030209>

Yruela, I. (2005). *Copper in plants*. Brazilian Journal of Plant Physiology, 17(1). DOI:10.1590/S1677-04202005000100012

Zhang, S., Griffiths, J. S., Marchand, G., Bernards, M. A., & Wang, A. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: An emerging and rapidly spreading plant RNA virus that threatens tomato production worldwide. *Molecular plant pathology*, 23(9), 1262–1277. <https://doi.org/10.1111/mpp.13229>