

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA



Actividad Antifúngica de Nanopartículas Metálicas y No Metálicas para el Control
de la Marchitez Vasculare por *Fusarium equiseti*

Por:

JESUS MANUEL DE LA ROSA TORRES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA

Actividad Antifúngica de Nanopartículas Metálicas y No Metálicas para el Control
de la Marchitez Vasculare por *Fusarium equiseti*

Por:

JESUS MANUEL DE LA ROSA TORRES

TESIS

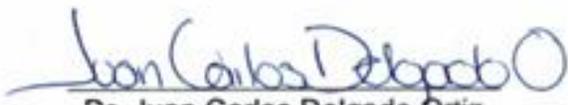
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

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

Diciembre, 2024.



Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta academia 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 y sancionado por las autoridades correspondientes.

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

Pasante



Jesús Manuel De La Rosa Torres

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por permitirme alcanzar esta meta, por darme salud y siempre guiarme por buen camino, por siempre encomendarme a él en los momentos más difíciles.

A mis **padres** por darme la gran oportunidad de seguir estudiando, por siempre apoyarme, y dejarme volar para cumplir mis sueños, pero sobre todo por confiar en mí y siempre animarme a seguir adelante.

A mi **hermano** por ser esa personita que siempre me daba ánimos y me hacía ver siempre como el mejor.

A mis **abuelos** por siempre confiar en mí y a pesar de las complicaciones, siempre apoyaron esta meta, estoy tan agradecido con ustedes.

A mi **ALMA TERRA MATER**, a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por convertirse en mi segunda casa, abrir sus puertas y ayudarme inmensamente a adquirir los conocimientos necesarios para culminar la carrera.

Al **Dr. Juan Carlos Delgado Ortiz** por darme la confianza en trabajar con él, por siempre corregirme y ayudarme con las inquietudes que se iban presentando, pero sobre todo por tener la paciencia y dedicación por ayudarme a culminar este proyecto.

A la **Dra. Mariana Beltrán Beache** por proporcionarnos el material biológico para llevar a cabo esta investigación y la colaboración en la revisión del proyecto.

A la **Dra. Yisa María Ochoa Fuentes** y al **Dr. Ernesto Cerna Chávez** por la colaboración para la revisión del proyecto.

Al **MC. Víctor Manuel Sánchez Valdés †** aparte de ser mi paisano, por ser un gran tutor y siempre poner primero que nada las necesidades del alumno y por sus grandes consejos.

Al **ING. Gerardo Rodríguez Galindo** por siempre apoyarme y aconsejarme en mi estancia en la universidad, pero sobre todo por su gran amistad que me ha brindado.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortes Bracho** por todo el apoyo que me brindo en mi estadía universitaria, por sus consejos y por la gran amistad que existe con la familia De La Rosa.

A **Lourdes Morones Hernández †** por siempre creer en mí y por todo el apoyo que realizo hacia mí y mi familia.

A **Aidyl M. Flores Saucedo y Ricardo J. López Coronado** por ser los primeros amigos que me dio la universidad y me hicieron pasar una estadía universitaria muy bonita, por siempre apoyarme y aconsejarme en todo.

A **Andrés Y. Reyes Galaviz** al hermano que la universidad me dió, por siempre seguirme en todas las decisiones que tomaba, pero sobre todo en los problemas, gracias por todo lo que haces por mí.

A mis compañeros de generación **Rubén Ortega, Daniel Castillo, Luis Ángel Zamudio, Alejandra Zavala y Víctor Almonte**, por brindarme su gran amistad y, sobre todo, el apoyo que siempre me brindaron, gracias por hacer las clases llenas de risas.

A mis padrinos **Carolina De la Rosa Flores** e **Ignacio Guerrero Almanza †** que desde pequeño me inculcaron llevar el camino del bien y gracias a sus consejos lo estoy logrando.

A los **Docentes del departamento de Parasitología**, que me ayudaron, apoyaron y sobre todo me compartieron sus conocimientos que me ayudaron a culminar la carrera muchas gracias.

A todos ellos **MUCHAS GRACIAS.**

DEDICATORIAS

A mi madre: **Elizabeth Torres Valdés**

Por siempre apoyarme en mis sueños, por confiar en mí, pero sobre todo en esas platicas que teníamos, cuando sentía que no podía más me dabas fuerzas para seguir y gracias a ello hoy culminamos este logro Te amo.

A mi padre: **Tomás Manuel De La Rosa Olveda**

Por dejarme seguir mis sueños y a pesar de las adversidades siempre estuviste para mi apoyándome, muchas gracias por ser uno de los pilares en mi vida, pero sobre todo en esos consejos que me forjaron a ser el hombre que ahora soy, Te amo.

Padre y Madre, pueden estar tranquilos porque criaron a un hombre de bien.

A mi hermano: **Tomás Esteban De La Rosa**

Por siempre confiar en mí y darme ánimos cuando no podía, sé que fue difícil para nosotros sepáranos, pero al fin se logró esta meta, Te Amo pequeño.

A mis abuelos paternos **Tomás De La Rosa Flores y Elodia Olveda Chavarria**

Por siempre brindarme la confianza y consejos que me ayudaban día a día a afrontar la vida en la universidad, por siempre recibirme con los brazos abiertos cuando llegaba a casa, pero sobre todo por el cariño que me tienen los amo.

A mis abuelos maternos **José Guadalupe Torres Silva y María de los Santos Valdés Alemán †**

Por siempre estar apoyándome en la vida y dándome ánimos para seguir en la universidad **María de los Santos Valdés Alemán †**, aunque no estas físicamente, sé que estarías orgullosa porque tu nieto logro su sueño te extraño, un abrazo hasta el cielo.

A **Karla Cornelio Ramos** por el apoyo que me brindaste, por creerme y darme ánimos cuando sentía que ya no podía, por el cariño que me has brindado, pero sobre todo por estar para siempre para mí te quiero mucho. **Y a tu familia** por siempre creer que yo podía y darme ánimos para culminar la carrera.

Con mucho cariño **Jesus Manuel De La Rosa Torres**

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIAS	VII
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIII
1.-INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Origen del Cultivo	4
2.2. Importancia del Cultivo del Tomate.....	4
2.2.1. Producción internacional del cultivo del tomate	4
2.2.2. Producción nacional del cultivo del tomate	5
2.3. Descripción Botánica del Cultivo.....	6
2.3.1. Tallo.....	6
2.3.2. Hoja	6
2.3.3. Flor	7
2.3.4. Fruto	7
2.3.5. Raíz	7
2.4. Principales Problemas Fitosanitarios del Cultivo del Tomate	7
2.4.1.-Principales plagas del cultivo del tomate.....	8
2.4.2. Principales enfermedades del cultivo del tomate.....	8
2.5. Marchitez Vascular del Tomate (<i>Fusarium</i> sp.)	9
2.5.1. Taxonomía del género <i>Fusarium</i>	10
2.5.2. Descripción de la sintomatología	10
2.5.3. Epidemiología	10
2.6. Principales Estrategias de Manejo.....	12
2.6.1. Control biológico	12
2.6.2. Control biorracional.....	13
2.6.3. Control químico.....	14
2.7. Uso de la Nanotecnología en la Agricultura	15
2.7.1. Uso de nanotecnología para el control de enfermedades	16
3.-MATERIALES Y MÉTODOS.....	20

3.1. Material biológico (cepa <i>F. equiseti</i>)	20
3.1.1. Verificación de la Especie.....	20
3.2. Nanomateriales.....	20
3.3. Evaluación <i>in vitro</i> de la actividad antifúngica de nanopartículas (Si, Co, Cu, Zn) Sobre <i>F. equiseti</i>	21
3.4. Establecimiento de experimento en invernadero	22
4.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.-CONCLUSIONES	33
6.-BIBLIOGRAFÍAS.....	34

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estados productores de tomate en México (SIAP, 2023).....	5
Tabla 2. Daños producidos por las Np's en fitopatógenos	17
Tabla 3. Tratamientos aplicados en invernadero	23
Tabla 4. Efecto inhibitorio <i>in vitro</i> de las nanopartículas sobre <i>Fusarium equiseti</i> . 26	
Tabla 5. Estimación de la concentración inhibitoria media de las nanopartículas evaluadas en el ensayo <i>in vitro</i>	28
Tabla 6. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad acumulada de plantas inoculadas con <i>F. equiseti</i>	29
Tabla 7. Variables agronómicas de la evaluación en invernadero	30
Tabla 8. Variables agronómicas de la evaluación en invernadero	32

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras morfológicas de <i>F. equiseti</i> y sintomatología en plantas de tomate	11
Figura 2. Arreglo de las Np's y concentraciones en la placa de 96 pozos.	21
Figura 3. Diagrama de la distribución espacial de los tratamientos	24
Figura 4. Características macro y microscópicas de <i>F. equiseti</i>	25

RESUMEN

El tomate es uno de los cultivos más importantes de México y a nivel mundial, por su importancia económica; México por su productividad se encuentran dentro del top 10 de los países con mayor producción a nivel mundial. El tomate se ve afectado por la marchitez vascular causada por *F. oxysporum*, causando pérdidas considerables en su producción. En el año 2023 se obtuvo un primer registro de marchitez vascular causada por *F. equiseti* en el estado de Zacatecas y Aguascalientes. Se evaluaron Np's de CuO, CoO, ZnO y SiO a concentración de 4000-15.62 ppm en la cepa Fus ep:1 a través de la técnica de microdilución en placa; de las cuales se llevaron a campo la CI₅₀ y CI₇₅, el ensayo en campo consto de 11 tratamientos (dos concentraciones por cada Np's, un testigo químico, un testigo absoluto y un testigo inoculado); en los cuales se evaluó ABCPE, diámetro del tallo, longitud del tallo, peso del tallo, longitud de raíz, peso de raíz, número de botones florales, número de racimos florales, clorofila total y nitrógeno. En la evaluación *in vitro* se obtuvo una inhibición del crecimiento micelial de 11.12-100 %, siendo las Np's de ZnO y CuO las que presentaron una inhibición progresiva en las concentraciones evaluadas. Señalando que la aplicación de las Np's de CoO y ZnO fueron las que registraron el menor daño acumulado en plantas de tomate inoculadas con *F. equiseti* en un 7.33-7.58 %. En invernadero las Np's de CoO y ZnO mostraron la mayor eficiencia en las variables evaluadas, promoviendo un mejor desarrollo en las variables DT, LT, PT, LR, PR, NBF, NRF, y CT.

Palabras clave: Nanopartículas, marchitez vascular, evaluación *in vitro*, *Fusarium equiseti*, Np's CoO, Np's ZnO.

1.-INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L) es un cultivo que su origen es en Sudamérica en las zonas andinas de Perú, Bolivia, Ecuador y norte de Chile. Siendo domesticado en México, después fue llevado por conquistadores a Europa (Arredondo, 2017).

El tomate es uno de los cultivos más importantes de México y a nivel mundial, por su importancia económica y ha sido por muchos siglos elemental en la dieta básica de las personas, por ser una fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes; los minerales que contiene son: calcio, fósforo, potasio, y algunas vitaminas como B1, B2, y C (Gobierno de México, 2024). Cualquier cultivo que este establecido es propenso a diferentes problemas fitosanitarios como lo pueden ser las plagas insectiles, malezas, enfermedades bacterianas, virales y fúngicas (Monge, 2021).

Se sabe que el cultivo del tomate puede ser afectado por diversos patógenos como: *Phytophthora* spp., *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Stemphylium solani*, *Botrytis cinérea*, *Cladosporium fulvum*, *Alternaria solani*, *Erysiphe* sp., *Leveillula taurica*, marchitamiento vascular causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, siendo las principales enfermedades que atacan al cultivo del tomate creando un mayor impacto económico en su producción (Obregón, 2014).

Fusarium spp. responsable de la marchitez vascular, habita frecuentemente en el suelo, sus esporas entran a través de la raíz, donde gracias a proteínas, micotoxinas y entre otros diferentes componentes inactivan las defensas de las plantas huéspedes, estos generando que el micelio fúngico se comience a acumular en el xilema; provocando la enfermedad de la marchitez vascular (Castillo, 2022). La

marchitez vascular del tomate es causada por el patógeno *Fusarium* spp; la sintomatología por *F. equiseti* presenta pudrición de la raíz principal, necrosis en el haz vascular con apariencia corchosa, pudrición de la corona del tallo y un amarilleo ascendente; siendo actualmente uno de los agentes causales de resiente asociación con la enfermedad (Beltran *et al.*, 2023).

Las principales estrategias del MIP son: prevención, monitoreos, un buen diagnóstico de la enfermedad (realizar los correctos análisis para verificar la enfermedad), establecer y checar los umbrales económicos, estrategias de manejo (manejo cultural, biológico, genético químico, etc.) (Vázquez, 2017). Buscando con esto estrategias de manejo con organismos biológicos como lo pueden ser *Streptomyces* (Ríos, 2021) y antagonistas como *Bacillus* y *Trichoderma* (Tinajero, 2021). Los extractos vegetales son compuestos de metabolitos secundarios que presentan mecanismos de defensa que son eficientes para el control de enfermedades fitopatógenas y son amigables con el medio ambiente y menos tóxicos para los humanos (Guédez *et al.*, 2014).

En las enfermedades que son causadas por *Fusarium* spp. y otros hongos son utilizados los fungicidas sistémicos como son del grupo de los benzimidazoles, en este grupo se encuentran: benomil, carbendazin, tiabendazol y tiofanato, sin embargo, puede ser probable que estos fungicidas sean mutagénicos en las plantas, así como se ha demostrado que incrementa la resistencia de los patógenos al efecto de los fungicidas (Villa, (2015).

En la agricultura, los nuevos retos y desarrollos tecnológicos a los que se están involucrando la nanotecnología, las Np's tienen la capacidad de controlar el crecimiento de organismos fitopatógenos que afectan a los cultivos y que estos han generado resistencia a los productos químicos comerciales. Resultados han demostrado que son capaces de generar un antagonismo *in vitro* de las Np's biosintetizadas contra cepas de fitopatógenos que son causantes de problemas serios en la agricultura como: *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum*, *Clavibacter michiganensis* y *Pseudomonas syringae*, lo cual se presenta como una alternativa en

el control y manejo de patógenos como bacterias y hongos fitopatógenos (Vera, 2022).

Justificación

Fusarium equiseti es uno de los agentes causales de la marchitez vascular en tomate en México, es uno de los fitopatógenos de mayor importancia en el cultivo ya que pueden ocasionar grandes pérdidas en la siembra y la producción, debido al mecanismo de infección que presentan. En la mayoría de los casos el uso de fungicidas químicos tiene eficacia muy limitado en el control de la enfermedad, por lo cual se requiere la búsqueda de alternativas eficientes para su control.

Objetivo general

Evaluar la actividad antifúngica de nanopartículas metálicas y no metálicas para el control de la marchitez vascular por *Fusarium equiseti* en tomate.

Objetivos específicos

- Evaluar *in vitro* el efecto antifúngico de nanopartículas metálicas y no metálicas para el control de *Fusarium equiseti* cepa (Fus Ep:1.)
- Evaluar el control de nanopartículas metálicas y no metálicas para el control de la marchitez vascular en tomate, bajo invernadero.

Hipótesis

Se espera que por lo menos una de las nanopartículas evaluados muestre un control eficiente del hongo *Fusarium equiseti* en el cultivo de tomate *Solanum lycopersicum* L. en las evaluaciones *in vitro* como en el invernadero.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen del Cultivo

Se conoce que su origen es en Sudamérica en las zonas andinas de Perú, Bolivia, Ecuador y norte de Chile. Posiblemente desde las zonas de origen se distribuyó a todo el continente por las altas migraciones que habían, fue llevado a partes de Centroamérica y México siendo domesticado y ha sido por muchos siglos elemental en la dieta básica de las personas, después fue llevado por conquistadores a Europa (Arredondo, 2017).

2.2. Importancia del Cultivo del Tomate

El jitomate es uno de los cultivos más importantes de México y a nivel mundial, por su importancia económica, y también porque es una fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes, los minerales que contiene son: calcio, fósforo, potasio, y algunas vitaminas como son B1, B2, y C (Gobierno de México, 2024).

Además, tiene algunas propiedades medicinales como las siguientes: antiséptico, alcalinizante, depurativo, diurético, digestivo, laxante, desinflamatorio, remineralizante. El uso del jitomate es infinito, tanto medicinal, en la gastronomía, y en el comercio de México y el mundo (Gobierno de México , 2024)

2.2.1. Producción internacional del cultivo del tomate

México por su productividad se encuentra dentro del top 10 de los países con mayor producción a nivel mundial. China estableció 22.1% de superficie mundial

sembrada, lo cual le permitió generar 67.5 millones de toneladas, gracias a ello lidero la lista de los países productores (SIAP, 2023).

Para el año 2022 y como segundo año consecutivo México alcanzó un máximo histórico, superando a un millón 800 mil toneladas, considerando que gracias a ello se sigue manteniendo en el liderazgo de la exportación mundial. México abastece al mercado con volúmenes aproximados a un millón 600 mil toneladas anuales desde el año 2015 y tendiendo como importadores a países como España, Israel, Francia y Alemania, siendo que Estados Unidos es el principal importador mundial de esta hortaliza, mientras que México provee un 24.7% de la oferta mundial (SIAP, 2023).

2.2.2. Producción nacional del cultivo del tomate

En la producción del cultivo del tomate de las 3,461,766 toneladas producidas para el año 2022, Sinaloa es el primer estado productor de tomate con una producción de 638,699 toneladas, seguido de San Luis Potosí con una producción de 446,295 toneladas y como tercer lugar tenemos a Michoacán con una producción de 325,972 toneladas, seguido por estados como Jalisco, Baja California Sur, Zacatecas, etc.; como se puede observar en la (Tabla 1), esto quiere decir que gracias a las exportaciones anuales pueden abastecer el mercado nacional e incluso el mercado de exportación (SIAP, 2023).

Tabla 1. Estados productores de tomate en México (SIAP, 2023)

Ranking	Entidad federativa	Volumen (toneladas)	Variación (%) 2021-2022
1	Sinaloa	638,699	-5.7
2	San Luis Potosí	446,295	1.2
3	Michoacán	325,972	15.1
4	Jalisco	202,857	2.6
5	Baja California Sur	185,010	6.6
6	Zacatecas	179,583	12.9
7	Morelos	169,352	2.9
8	Puebla	154,083	10.4
9	México	133,696	8.0

10	Sonora	129,385	1.5
	Resto	896,561	7.2
	Total, nacional	3,461,766	4.1

2.3. Descripción Botánica del Cultivo

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertenece a la familia de las solanáceas, este se originó en el oeste de América del Sur, entre las regiones del norte de Chile y Ecuador, posteriormente se distribuyó hacia los trópicos y subtrópicos de México donde fue en este país donde se domesticó y así se considera como centro de domesticación (Díaz, 2019).

2.3.1. Tallo

Dentro de las características botánicas que conforman al cultivo, tenemos que el tallo. es grueso, pubescente, anguloso y de color verde. Mide entre 2 y 4 cm de ancho y es más delgado en la parte superior. El tallo principal se conforma de tallos secundarios, nuevas hojas, y en la posición distal se ubica el meristemo apical, de donde surgen nuevos primordios florales y foliares (Monardes, 2009).

2.3.2. Hoja

Otra característica botánica del cultivo son las hojas pinnadas y compuestas. Presenta de siete a nueve folíolos peciolados que miden de 4-60 mm x 3-40 mm, lobulados y con borde dentado, alternos, opuestos y por lo general, de color verde, glanduloso-pubescente en el haz y cenicento por el envés. Se encuentra recubierta de pelos glandulares y dispuestos en posición alternada sobre el tallo (Monardes, 2009).

2.3.3. Flor

La flor de este cultivo de tomate es perfecta; consta de 5 o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo estos están dispuestos de forma helicoidal y de igual número de estambres que se alternan con los pétalos. Las flores se agrupan en inflorescencias denominadas comúnmente como racimos (Monardes, 2009).

2.3.4. Fruto

Este fruto es denominado como baya bi-plurilocular que puede alcanzar un peso aproximado que van desde miligramos hasta 600 gr aproximadamente. Y está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas (Monardes, 2009).

2.3.5. Raíz

La raíz se compone por la raíz principal y las raíces secundarias y adventicias, estas son numerosas en cantidad lo que las hace potentes y no superan los 30 cm de profundidad. Estas se constituyen por tres partes: epidermis, córtex y cilindro vascular; la epidermis es la que contiene los pelos absorbentes, que son los encargados de absorber agua y nutrientes, mientras que el conjunto de córtex y cilindro vascular son encargados de cumplir con la función de transportar todos los nutrientes (Monardes, 2009).

2.4. Principales Problemas Fitosanitarios del Cultivo del Tomate

Como se sabe cualquier cultivo que este establecido esta propenso a diferentes problemas fitosanitarios como lo pueden ser problemas de: (plagas insectiles, malezas, enfermedades bacterianas, virales y fúngicas). Las plagas y enfermedades son causantes de daños económicos muy importantes en el cultivo

del tomate, esto lleva a resultados como reducción de rendimiento y pérdidas económicas considerables (Monge, 2021).

2.4.1.-Principales plagas del cultivo del tomate

Las principales plagas que afectan al cultivo del tomate son muchas, algunas con problemas económicos grandes y otras de menor importancia, como lo pueden ser, ácaros: ácaro bronceado del tomate (*Aculops lycopersici*), ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*), Arañita roja (*Tetranychus* sp.), plagas de insectos como: trips del tomate (*Frankliniella schultzei*), trips californiano de las flores (*Frankliniella occidentalis*), trips de la cebolla (*Thrips tabaci*), trips del poroto (*Caliothrips phaseoli*), moscas blancas (*Bemisia tabaci*), (*Trialeurodes vaporariorum*), estas plagas son importantes en el cultivo, ya que son vectores de algunos virus como lo puede ser Groundnut ringspot virus (GRSV), Tomato spotted wilt virus (TSMV), Tomato chlorotic spot virus (TCSV), entre otros; pulgones: pulgón verde del duraznero (*Myzus persicae*), pulgón del algodónero (*Aphis gossypii* Glov.), pulgón verde de la papa (*Macrosiphum euphorbiae*), cochinilla harinosa (*Phenacoccus* sp), polilla del tomate (*Tuta absoluta*), vaquita de San Antonio (*Diabrotica speciosa*), gorgojo del tomate/ picudo del tomate (*Phyrdenus muriceus*) minador de las hojas (*Lyromyza* sp.) (Caceres, 2020).

2.4.2. Principales enfermedades del cultivo del tomate

Las enfermedades en un cultivo principalmente son alteraciones en la fisiología normal de la planta que se están produciendo, es la consecuencia de la acción de diferentes agentes bióticos que se nombran como patógenos (bacterias, virus, hongos) y también por agentes abióticos que pueden ser (deficiencias de nutrición, genéticos, entre otros). Se debe tener en cuenta que dependiendo la época del año en el que se encuentre, el clima y el manejo que se le dé al cultivo es la incidencia de enfermedades que se puedan presentar (Mota, 2021).

Como se sabe el cultivo del tomate puede ser afectado por diversos patógenos siendo este el caso de patógenos bacterianos como: cancro bacteriano (*Clavibacter michiganensis subs. michiganensis*), marchitamiento bacteriano (*Ralstonia solanacearum*), podredumbre blanda (*Erwinia carotovora subsp. carotovora*), necrosis medular (*Pseudomonas* sp.), así mismo podemos encontrar problemas causados por virus, de mayor importancia tenemos: Virus bronceado del tomate (TSWV), Virus de la mancha anular del maní (GRSV), Virus de la mancha clorótica del tomate (TCSV), todos estos conocidos como la peste negra del tomate y siendo transmitidos principalmente por trips, incluyendo también a los *Begomovirus* (estos transmitidos por mosquita blanca principalmente), también se pueden presentar problemas causados por hongos como lo pueden ser: *Phytophthora* spp., *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani*, entre otros, estos conocidos particularmente como la enfermedad del Damping-off, podredumbre de la base del tallo (*Sclerotium rolfsii*), moho blanco (*Sclerotinia sclerotiorum*), tizón tardío (*Phytophthora infestans*), mancha gris (*Stemphylium solani*), moho gris (*Botrytis cinérea*), moho de la hoja (*Cladosporium fulvum*), tizón temprano (*Alternaria solani*), oídio (*Erysiphe* sp.), oidiopsis (*Leveillula taurica*) y marchitamiento vascular (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*) (Obregón, 2014).

2.5. Marchitez Vascular del Tomate (*Fusarium* sp.)

Fusarium sp. responsable de la marchitez vascular, habita frecuentemente en el suelo, sus esporas entran a través de la raíz. Gracias a las proteínas, micotoxinas y entre otros diferentes componentes inactivan las defensas de las plantas huéspedes, estos generando que el micelio fúngico se comience a acumular en el xilema, esto genera que el agua y los nutrientes no suban y fluyan hacia las hojas y frutos esto provocando la enfermedad de la marchitez vascular. Esta enfermedad es de las más dañinas para el cultivo, gracias a que es muy fácil la propagación del patógeno, y por ende cause problemas económicos significativos en la producción y en el manejo de esta enfermedad (Castillo, 2022).

2.5.1. Taxonomía del género *Fusarium*

Phylum: Ascomycota

Clase: Sordariomycetes

Orden: Hypocreales

Familia: Nectriaceae

Género: *Fusarium* (EPPO, 2020)

2.5.2. Descripción de la sintomatología

La marchitez vascular del tomate se da por el género *Fusarium* sp.; lo que caracteriza a este hongo es su sintomatología, que empieza desde las hojas inferiores; estas se vuelven cloróticas y empieza con la marchitez del follaje, teniendo en cuenta que sus síntomas aparecen generalmente de un solo lado de la hoja se vuelven amarillentas y se comienzan a marchitar las hojas o rama. El tejido vascular empieza a obtener una tonalidad oscura, y se comienza a notar más en el punto de inserción del peciolo, la parte baja del tallo muchas de las veces se ensanchan y por consecuencia la planta termina con una marchitez y muerte ascendente (Obregón, 2014). La sintomatología por *F. equiseti* presenta pudrición de la raíz principal, necrosis en el haz vascular con apariencia corchosa, pudrición de la corona del tallo y un amarilleo ascendente (Beltran *et al.*, 2023).

2.5.3. Epidemiología

El hongo sobrevive en el suelo en restos vegetales o saprofito, donde este puede ser viable aproximadamente 10 años. Cuando una planta se establece en el suelo contaminado por el hongo, el contacto de las raíces induce la germinación de los conidios, tubo germinativo de la espora o el micelio este ingresa por el ápice de las raíces, a través de heridas o de los puntos de formación de las raíces laterales (Vázquez, 2017). El micelio sigue avanzando por medio del córtex de las raíces

alcanzando los vasos del xilema. El micelio permanece en los vasos y se transloca a través de ellos, hacia las partes de arriba en el tallo y la corona principalmente. En los vasos, el micelio se ramifica y se producen microconidios; y estos, en el próximo vaso son liberados y llevados hacia el ápice por la corriente de la savia. Estos microconidios germinan en el punto donde el movimiento se detiene penetrando el micelio la pared superior del vaso y produciendo más microconidios para los siguientes vasos. El micelio también puede avanzar lateralmente dentro de los vasos adyacentes penetrando por los extremos. Esta combinación de procesos llamado taponamiento de los vasos a causa del micelio, esporas, gomas y tálides y el aplastamiento de los vasos por la proliferación de células adyacentes del parénquima, es responsable de la marchitez (Vázquez, 2017).

Fusarium, se puede diseminar a distancias cortas por medio del agua, equipos agrícolas utilizados y herramientas infestadas por el hongo y a distancias largas, por medio de plantas enfermas, sustrato o suelo adherido a ellas que contengan el inoculo, una vez que el suelo es infestado permanece así indefinidamente.

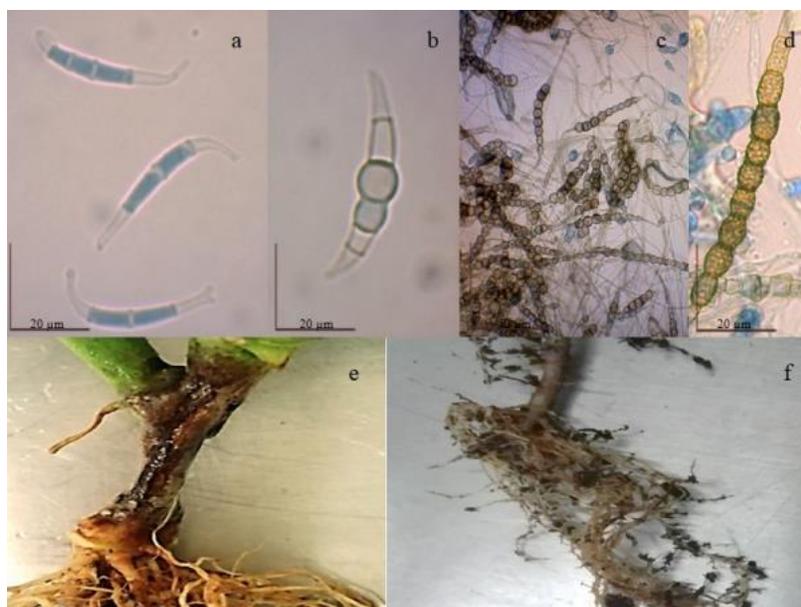


Figura 1. Estructuras morfológicas de *F. equiseti* y sintomatología en plantas de tomate. Macroconidios de *F. equiseti* con célula basal en forma de pie, célula apical ligeramente curvada y célula media hinchada (a, b); clamidosporas de *F. equiseti* (c, d); síntomas de campo de plantas de tomate donde se obtuvieron cepas

de *F. equiseti* (e); síntomas de pudrición y pudrición de la corona inducida por la inoculación artificial de *F. equiseti* (f) (Beltran *et al.*, 2023).

2.6. Principales Estrategias de Manejo

Las principales estrategias del MIP son: prevención, monitoreos, un buen diagnóstico de la enfermedad (realizar los correctos análisis para verificar la enfermedad), establecer y checar los umbrales económicos, estrategias de manejo (manejo cultural, biológico, genético químico, etc.) (Vázquez, 2017).

Entre los principales métodos de control de enfermedades han colocado el control químico como número uno, pero a consecuencia de eso le han puesto miras rojas ya que causa grandes controversias por la grande contaminación que estos generan además de la resistencia que estos generan; por ello se han buscado alternativas ecológicas y amigables con el medio ambiente (Chávez, 2011).

2.6.1. Control biológico

Se han estado buscando alternativas de control que sean económicas y ecológicas para el manejo de esta enfermedad, entre las alternativas se encuentran un grupo muy grande de bacterias y hongos que pueden mitigar y ayudar con el control de la enfermedad, como pueden ser bacterias del género *Streptomyces*, que son antagonistas a otros patógenos; el antagonismo de esta bacteria se debe a la producción de metabolitos secundarios que actúan como fungicida además que se combinan con enzimas extracelulares del tipo quitinasas y pectinasas; estos metabolitos son de color amarillo y son solubles en agua que ejercen efectos inhibitorios sobre los crecimientos de diferentes patógenos como los géneros *Curvularia*, *Aspergillus*, *Helminthosporium*, *Alternaria*, *Phytophthora*, *Colletotrichum*, *Rhizoctonia* y *Fusarium* (Rios, 2021).

Bacillus subtilis y *Trichoderma* spp. se caracterizan por tener efectos antagónicos contra las enfermedades causadas por patógenos; *Trichoderma harzianum*, se ha

utilizado por tener mecanismos de control contra *Fusarium solani*, además que es antagonístico contra bacterias fitopatógenas y es capaz de inhibirlas en un 32%. lo cual se puede deber a que *Trichoderma* spp. genera enzimas que pueden ser proteasas, quitinasas y glucanasa, que dañan la pared del hongo generando antibiosis y una lisis lo que favorece el micoparasitismo del hongo (Ribeiro, 2019). *Bacillus* spp. es un inductor de crecimiento de las plantas aun cuando estén infectados por *Fusarium* spp. Además de que *B. subtilis* ha demostrado antagonismo en confrontaciones de *B. subtilis* frente a *Fusarium* spp. y es un eficiente productor de antibióticos y enzimas que ayudan a la solubilización de fosfatos y fijación del nitrógeno en el suelo (Tinajero, 2021).

2.6.2. Control biorracional

Los extractos vegetales se han ido implementando, gracias a las características de sus moléculas o principios activos que tienen un amplio rango de aplicaciones, desde protección de cultivos, industria o comidas como antimicrobianos y antifúngico, el uso de los principios activos botánicos (PAB) en la agricultura surge después de la necesidad de desarrollar medidas alternas al control de enfermedades y sus productos (Letessier, 2013), ya que la aplicación de fungicidas químicos ha generado grandes problemas ambientales y problemas a la salud humana, además como consecuencia se tienen enfermedades fitopatógenas más agresivas y con altas resistencias, así como incrementos en el costo de producción y venta. Los extractos vegetales presentan propiedades antifúngicas, los cuales representan una alternativa para el manejo de enfermedades de las plantas, debido al contenido de metabolitos secundarios como flavonoides, fenoles, terpenos, aceites esenciales, alcaloides, lectinas y polipéptidos (Górniak *et al.*, 2019) Poseen un amplio espectro de acción para controlar a los organismos que tienen interés comercial, ya que son usados como antimicrobianos y antifúngicos, su eficacia depende de la presencia y concentraciones de los componentes que estos extractos o aceites esenciales que estos contienen; actualmente existen PABs que se han ido purificando de manera aislada y desconocen su eficacia contra los

patógenos de importancia, ya que se encuentran como aceites esenciales que son muy volátiles y generalmente se utilizan como repelentes, sin embargo se están buscando nuevas formulaciones para que estas puedan ser utilizadas como productos de contacto contra plagas insectiles y enfermedades (Cerna, 2019).

Actualmente en la agricultura se va buscando soluciones alternativas al uso de los agroquímicos, para controlar los patógenos causantes de enfermedades, pero buscando no generar daños a la salud humana. Se han evaluado el efecto de los extractos metanólicos (EM) de diferentes plantas como: Moringa (*Moringa oleífera*), Aguacate (*Persea americana*), Cola de caballo (*Equisetum hymale*), Gobernadora (*Larrea Tridentata*), Gordolobo (*Gnaphalium semiamplexicuale*), Boldo (*Peumus boldus*), Prodigiosa (*Brickellia squarrosa*), Romero (*Rosmarinus officinalis*), y Costomate (*Physalis coztomatl*) para el control de enfermedades causados por los fitopatógenos *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*. Teniendo un excelente resultado del (EM) de Gobernadora que inhibió 100 % del crecimiento de *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani* hasta por 144 h y *F. oxysporum* hasta por 240h. Seguido de los EM de Prodigiosa y Romero; inhibiendo el crecimiento micelial. Demostrando que estos extractos representan una nueva y excelente alternativa para el control y manejo de enfermedades causados por fitopatógenos (Rodríguez *et al.*, 2020).

2.6.3. Control químico

El control de los organismos fitopatógenos del suelo es de los más difíciles de controlar, por ello se han desarrollado prácticas culturales, control biológico y control químico, siendo este último el más utilizado ya que gracias a ello es el más eficaz a comparación de otros métodos de control de las enfermedades; en las enfermedades que son causadas por *Fusarium* spp. y otros hongos, son utilizados los fungicidas sistémicos del grupo de los benzimidazoles, en este grupo se encuentran: benomil, carbendazin, tiabendazol y tiofanato, sin embargo puede ser probable que estos fungicidas sean mutagénicos en las plantas, así como se ha

demostrado que incrementa la resistencia de los patógenos al efecto de los fungicidas; se ha demostrado que el efecto genotóxico del benomil (Metil-1-(butilcarbomil) benzimidazol-2il-carbamato) en raíces de cebolla, al ser tratados con diferentes dosis de este fungicida, generando anomalías en las divisiones de las células (Villa, 2015).

Los cultivos son protegidos desde un principio con aplicaciones de sulfato de cobre y azufre. Pero actualmente existen muchos principios activos disponibles en el mercado, entre ellos destacan los ftalamidas o ditiocarbamatos de generación intermedia y son caracterizados por tener múltiples sitios de acción. El uso desmedido de los fungicidas ha generado grandes controversias debido a los efectos adversos que causan a la salud humana y medio ambiente, los compuestos fungicidas como: polifosfuro de calcio, oxiclورو de cobre, hidróxido cúprico, fludioxonil, azoxistrobina, metalaxil-M, tebuconazole, mancozeb, pricomidone y azoxistrobin, está comprobado que pueden generar resistencia en los patógenos y además de que pueden generar residualidad en los alimentos, suelo y aguas, además de bajar el rendimiento de los suelos agrícolas (Cabrera *et tal.*, 2019).

2.7. Uso de la Nanotecnología en la Agricultura

En los últimos años la aplicación de la nanotecnología (NT) en el sector agroalimentario es uno de los retos que ha tenido un gran crecimiento ya que su objetivo es la nano-investigación. Esta innovación se ha implementado para generar tecnología que ayuda a tener una mayor producción y calidad en los alimentos. El uso excesivo e indiscriminado de los agroquímicos sintéticos, para insectos, enfermedades y malezas; ha sido consecuente de grandes problemas a la salud del suelo de los agroecosistemas, contaminación al medio ambiente; pero un más grande es el desarrollo de resistencia en los insectos y microorganismos fitopatógenos. La nanotecnología está teniendo un avance muy grande, ya que puede ayudar a sectores de la agricultura, pudiendo detectar las enfermedades rápidamente en los cultivos (nanosensores), así como la capacidad que las plantas adquieren para absorber los nutrientes y crecer con mayor velocidad. Gracias a la

nanotecnología existe un amplio banco de oportunidades en la agricultura para producir nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, permitiendo grandes rendimientos de una manera más sustentable y con menos impacto ambiental a los agroecosistemas (Lira, 2018).

2.7.1. Uso de nanotecnología para el control de enfermedades

En la agricultura, los nuevos retos y desarrollos tecnológicos a los que se están involucrando la nanotecnología, está dirigida a mejorar el rendimiento de los cultivos, eficiencia en la absorción de nutrientes y el control de plagas y patógenos; investigaciones que se han realizado muestran que fertilizantes formulados como nanopartículas especialmente de (Np's) de óxidos de Zn, Fe, Mn y Cu, tienen el suficiente potencial de suministrar los micronutrientes a las plantas a través del suelo y hojas, teniendo un aumento del rendimiento de los cultivos. Además, las Np's tienen la capacidad de controlar el crecimiento de organismos fitopatógenos que afectan a los cultivos y que estos han generado resistencia a los productos químicos comerciales, teniendo como consecuencia que los agricultores utilicen mayor cantidad de productos químicos, unos más fuertes y en mayor cantidad causando problemas serios en la contaminación a los seres humanos y el medio ambiente. La nanotecnología nos puede ayudar para el monitoreo del suelo y detección de las enfermedades, estos formulados de las Np's nos pueden ayudar en el desarrollo y crecimiento del cultivo, detección de patógenos, parámetros de (pH y nutrientes), residuos de plaguicidas etc. Evaluaciones de Np's han demostrado que son capaces de generar un antagonismo *in vitro* de contra cepas de fitopatógenos que son causantes de problemas serios en la agricultura como: *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum*, *Clavibacter michiganensis* y *Pseudomonas syringae* (Vera, 2022).

Diversas Np's metálicas tiene propiedades antimicrobianas y tienen una variada aplicación; realizado evaluaciones de Np's para la prevención y control de las enfermedades causada por *Pseudomonas syringae* y *Clavibacter michiganensis*,

mostrando un efecto antibacteriano por las Np's de Ag, CuO, y ZnO. Siendo los factores que influyen en las actividades microbiana la dimensión, morfología, tipo de partícula y cristalinidad. Las Np's ejercen una citotoxicidad dependiendo la carga de la superficie de la membrana, la eficacia de los efectos nanotóxicos dependerá de la estructura de la pared celular objetivo, por lo que se le acredita la nanotoxicidad a la interacción electrostática entre las Np's con la membrana y la acumulación en el citoplasma (Ramos, 2018). En la tabla 2, se pueden observar algunos de los daños que ejercen las Np's en los fitopatógenos (Slavin y Bach, 2022).

Tabla 2. Daños producidos por las Np's en fitopatógenos

Np's	Efecto reportado de la Np's	Microorganismo donde se observó el efecto
Np's AgO	Perdida de la integridad de la membrana y de la función celular.	<i>Candida albicans</i>
Np's ZnO	Disminución de la dosis en ergosterol y quitina.	<i>Fusarium graminearum</i>
Np's de CuO y MgO	Apoptosis celular y ruptura de la pared celular.	<i>Candida albicans</i>
Np's de ZnO y AgO	Incremento en los niveles de carbohidratos (glucosa y trialosa) y ácidos nucleicos.	<i>Botrytis cinérea, Candida albicans y S. cerevisiae</i>
Np's AgO	Reducción de oxígeno reactivo.	<i>Candida albicans</i>
Np's TiO ₂	Peroxidación lipídica afectando los monómeros de la pared celular cortando el enlace	<i>Fusarium oxysporum</i>

Np's CuO	<p>glucosídico y creando poros en la pared.</p> <p>Desprendimiento de la membrana citoplasmática de pared celular</p> <p>disminución en la producción de fimbrias e hinchamiento de orgánulos.</p>	Levaduras
Np's de Ag, MgO, ZnO y CuO	<p>Deformación de la hifa (distorsionada y encogidas cambiando los patrones de crecimiento adelgazando las fibras hifales).</p>	<p><i>Fusarium graminearum,</i> <i>Colletotrichum gloeosporioides,</i> <i>Alternaria alternata,</i> <i>Botrytis cinerea,</i> <i>Fusarium oxysporum,</i> <i>Alternaria brassicicola,</i> <i>Phytophthora nicotianae,</i> <i>Thielaviopsis basicola,</i> <i>Aspergillus niger,</i> y <i>Erythricium salmonicolor.</i></p>
Np's de TiO ₂ , ZnO, Ag	<p>Disminuyen la germinación de la conidia y deforman la hifa. Daños como colapso de la célula engrosamiento de la conidia</p>	<i>Penicillum expansum</i>
Np's de Cu, Ni y Ag	<p>Disminuyeron la formación de biopelículas extracelulares</p>	<i>Candida albicans</i>

Np's Ag Incremento en la masa
mitocondrial por la
acumulación Ca^{2+}
favoreciendo la apoptosis *Candida albicans*
y modificando la
permeabilidad de la
mitocondria

3.-MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material biológico (cepa *F. equiseti*)

La cepa de *F. equiseti* [(Fus Ep: 1) fue colectada en el municipio de Fresnillo, Zacatecas en la colonia Miguel Hidalgo (el coyote)], fue proporcionada por la Dra. Mariana Beltrán Beache, del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, dicha cepa fue aislada de plantas de tomate con sintomatología en las plantas con pudrición de la raíz principal, necrosis del haz vascular con apariencia corchosa, pudrición de la corona del tallo y amarilleo ascendente (Beltran *et al.*, 2023).

3.1.1. Verificación de la Especie

Se corroboró la especie y se verificaron las características morfológicas de la misma, esto se realizó mediante la observación al microscopio de las estructuras de la macroconidia, microconidia, fiálides utilizando las claves Leslie and Summerell (2006).

3.2. Nanomateriales

Las nanopartículas de óxido de Cobre (CuO), oxido de Cobalto (CoO), oxido de Zinc (ZnO) y oxido de Silicio (SiO) fueron adquiridas en la empresa Najing XFNANO®.

3.3. Evaluación *in vitro* de la actividad antifúngica de nanopartículas (Si, Co, Cu, Zn) Sobre *F. equiseti*

Para la evaluación *in vitro* de las Np's se desarrolló la metodología de la técnica de microdilución en placa propuesta por Masoko *et al.* (2005). Los tratamientos utilizados fueron, Np's: Si, Np's Co, Np's Cu y Np's Zn a diferentes concentraciones. El acomodo del experimento se muestra en la Figura 2.

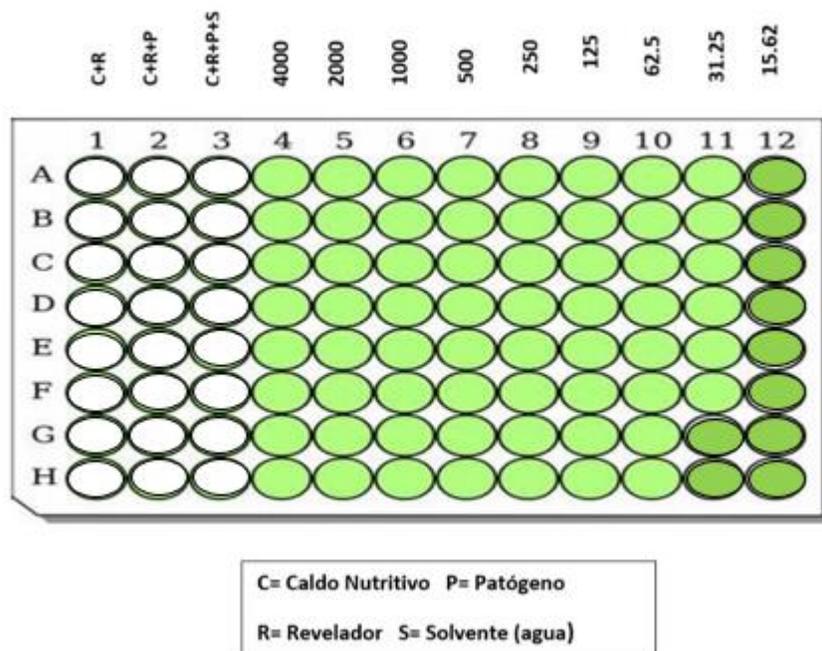


Figura 2. Arreglo de las Np's y concentraciones en la placa de 96 pozos.

La preparación de los bioensayos fue realizada de la siguiente manera:

1. Se colocaron 100 μ l de caldo en todos los pozos de la placa.
2. Se preparó una solución de cada una de las nanopartículas a una concentración de 8000 ppm, posteriormente se colocaron 100 μ l de las soluciones en la columna cuatro; se mezclaron y se volvió a tomar 100 μ l, y se transfirieron a la columna cinco; haciendo así sucesivamente una dilución seriada al 50%, este procedimiento se repitió hasta la columna 12.
3. El siguiente paso fue agregar el revelador de crecimiento a todos los pozos.

4. Finalmente, a partir en la columna dos a la 12; en cada uno de los pozos se le colocaron 10 μ l de una solución de esporas de *F. equiseti* a una concentración de 1×10^8 .

En cada placa se consideraron nueve concentraciones como tratamiento con ocho repeticiones cada uno; con un diseño experimental complemente al azar. Las placas se incubaron a 27°C por 48 h y finalmente se realizó una lectura de absorbancia de las placas a 490 nm en un fotómetro Multiskan Go (Thermo Scientific). Se consideró crecimiento positivo del hongo en los tratamientos donde cada pozo presentó un color rosado, además de los respectivos valores de absorbancia.

Con la variable porcentaje de inhibición del crecimiento se realizó un análisis de varianza y se realizó la separación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) con el programa estadístico del SAS versión 9.1. Así mismo, con los datos de inhibición de crecimiento se realizó un análisis Probit para el cálculo de la concentración inhibitoria media (CI₅₀).

3.4. Establecimiento de experimento en invernadero

La germinación de semilla se desarrolló con semillas de la variedad Río Grande, se realizó en charola de 200 cavidades con peat moss y perlita en proporción 1:1; transcurridos 28 días las plántulas se trasplantaron en bolsas de polietileno con capacidad de 10 litros con una mezcla de peat moss y perlita relación 1:1, las plantas establecidas en el experimento fueron regadas con la solución de Steiner (1961). La aportación de la solución Steiner fue suministrada según la etapa fenológica del cultivo: desde el trasplante al 25%, crecimiento vegetativo y aparición de botones florales al 50%, floración y amarre de frutos de frutos al 75% y para el llenado de frutos 100%. Para la inoculación se preparó una solución de un litro de agua destilada con una suspensión de esporas de *F. equiseti* de 1×10^8 . Al sistema radicular de cada plántula se le realizó una incisión en la parte inferior, posteriormente la plántula fue sumergida durante 60 minutos en la suspensión de esporas. Los tratamientos evaluados fueron: Nanopartículas de Cobre (Np's Cu), nanopartículas de Cobalto (Np's Co), nanopartículas de Silicio (Np's Si),

nanopartículas de Zinc (Np's Zn); las Np's fueron disueltas en agua a la cual se le agregó tres mL/L. Se realizó un diseño experimental completamente al azar con 11 tratamientos con 4 repeticiones por cada uno (ver Tabla 2) y (Figura 3). Se realizaron cuatro aplicaciones de Np's; la primera aplicación se realizó al momento del trasplante, posteriormente se aplicaron a los 15, 30 y 45 ddt (días después del trasplante).

Tabla 3. Tratamientos aplicados en invernadero

	Tratamiento
T1	Np Cu50 (217 ppm)
T2	Np Cu75 (2.222 ppm)
T3	Np Co50 (558 ppm)
T4	Np Co75 (8.119 ppm)
T5	Np Si50 (958 ppm)
T6	Np Si75 (6.780 ppm)
T7	Np Zn50 (55 ppm)
T8	Np Zn75 (6.780)
T9	T. Químico
T10	T. Absoluto (sin tratamiento)
T11	T. Inoculado (1×10^8 esporas/ml)

	T1 R1	T1 R2	T1 R3
	T2 R1	T2 R2	T2 R3
TA R1	T3 R1	T3 R2	T3 R3
TA R2	T4 R1	T4 R2	T4 R3
TA R3	T5 R1	T5 R2	T5 R3
TA R4	T6 R1	T6 R2	T6 R3
TA R5	T7 R1	T7 R2	T7 R3
TA R6	T8 R1	T8 R2	T8 R3
	TQ R1	TQ R2	TQ R3
	TI R1	TI R2	TI R3

TI R4	TI R5	TI R6
TQ R4	TQ R5	TQ R6
T8 R4	T8 R5	T8 R6
T7 R4	T7 R5	T7 R6
T6 R4	T6 R5	T6 R6
T5 R4	T5 R5	T5 R6
T4 R4	T4 R5	T4 R6
T3 R4	T3 R5	T3 R6
T2 R4	T2 R5	T2 R6
T1 R4	T1 R5	T1 R6

Figura 3. Diagrama de la distribución espacial de los tratamientos

VARIABLES EVALUADAS. La severidad de *F. equiseti* en las plantas inoculadas se determinó con base a la escala González-Merino *et al.* (2021) y Apodaca-Sánchez *et al.* (2004) Donde: 0: No hay síntomas visibles de la enfermedad; 1: Manchas necróticas en el hipocótilo; 2: Hojas marchitas, oscurecimiento en la base del hipocótilo o disminución del crecimiento de las plantas; 3: Marchitamiento, lesiones necróticas de 1 a 5 cm y disminución del crecimiento de las plantas; 4: Lesión necrótica de 6 a 10 cm, defoliación y disminución del crecimiento; 5: Muerte de la planta.

Con los datos de severidad se calculó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) se realizó mediante la fórmula de Shaner y Finley (1977), para lo cual se registró la severidad de la enfermedad cada semana desde la aparición de los primeros síntomas de *F. equiseti*. Adicionalmente se determinaron los parámetros agronómicos que se evaluaron en el experimento fueron: longitud del tallo (LT), diámetro del tallo (DT), peso del tallo (PT), longitud de raíz (LR), peso de raíz (PR) número de botones florales (NBF), número de racimos florales (NRF), clorofila total (CT) y nitrógeno en la planta (N).

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

Donde: ABCPE es el área bajo la curva sobre el progreso de la enfermedad, y_a se refiere a la intensidad de la enfermedad, t es el tiempo de evaluación en ddi y n el número total de evaluaciones.

Análisis estadístico Para cada variable evaluada (ABCPE, LT, DT, PT, LR, PR, NBF, NRF, CT y N) se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS versión 9.1.

4.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Corroboración de la especie: A través de la visualización de las a cepa Fus Ep: 1 coincide con las características morfológicas reportadas por Beltrán *et al.*, (2023); donde pudimos observar la producción de macroconidios con 5 a 7 septos, células basales en forma de pie, las células apicales alargada y ligeramente curvada. Adicionalmente se observó la producción de algunos macroconidios, los cuales contaban con células intermedias hinchadas. Así mismo se observaron cadenas de clamidosporas terminales, intercalares y aglomeradas con paredes gruesas y rugosas.

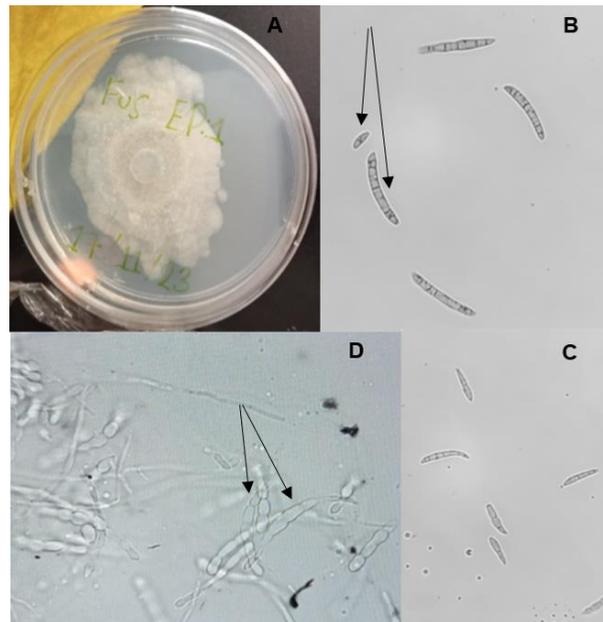


Figura 4. Características macro y microscópicas de *F. equiseti*. A. Crecimiento micelial de *F. equiseti*. B. Macroconidias y Microconidias C. Microconidias. D. Clamidospora.

Evaluación *in vitro* de las Np's. En la tabla 4, se puede observar el rango de inhibición generado por las Np's. Las Np's Co su inhibición oscila de 26.3-100%, siendo las concentraciones de 1000-4000 ppm donde se obtuvieron los niveles de inhibición más altos (43.82-100 %). En el caso de las Np Cu el rango de inhibición oscila de 29.7-100 %; siendo nuevamente las concentraciones de 1000-4000 ppm donde se observa la mayor significancia en la inhibición (62.9-100%). Mientras que en las Np Si, la inhibición se encuentra de 11.1-100 %; siendo las concentraciones de 2000-4000 ppm donde se alcanzaron los niveles más altos de control (43.5-100 %). Siendo que las Np Zn muestra un rango de inhibición de 17.1-89.9%, mostrando un mejor efecto de inhibición a partir de la 500-4000ppm (83.2-89.9 %).

Tabla 4. Efecto inhibitorio *in vitro* de las nanopartículas sobre *Fusarium equiseti*.

Tratamiento (ppm)	Cobalto	Cobre	Silicio	Zinc
4000	100.000 ± 0 A	100.00 ± 0 A	100.00 ± 0 A	89.927 ± 6.743 A
2000	46.180 ± 7.690 B	63.523 ± 9.87 B	43.520 ± 6.364 B	87.023 ± 5.493 A
1000	43.820 ± 4.845 B	62.972 ± 4.815 B	37.560 ± 2.410 BC	85.393 ± 2.748 A
500	39.099 ± 1.669 CB	54.276 ± 3.238 C	29.381 ± 5.863 CD	83.262 ± 0.406 A
250	37.881 ± 3.545 CB	44.463 ± 1.842 D	27.404 ± 11.092 CDE	72.330 ± 7.991 B
125	38.222 ± 12.322 CB	36.344 ± 3.098 E	24.878 ± 2.399 DE	61.994 ± 4.905 C
62.5	27.899 ± 8.318 C	36.154 ± 4.128 E	21.203 ± 3.734 FDE	57.843 ± 6.055 DC
31.25	27.366 ± 3.970 C	33.393 ± 3.238 E	15.995 ± 6.519 FE	51.464 ± 4.149 D
15.62	26.365 ± 12.322 C	29.747 ± 4.473 E	11.125 ± 6.334 F	17.206 ± 4561 E
p-valor	<0.001			

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Sharma *et al.*, (2017) en la evaluación de nanopartículas de CoFe_2O_4 a 500 ppm en *Fusarium oxysporum*, obtuvieron una inhibición de 87.6 %; cabe señalar que estos resultados son superiores a los alcanzados en esta investigación; ya que a la misma

concentración solo se alcanzó un 39 % de inhibición. Ma *et al.* (2022), menciona que las Np's Co también pueden inducir significativamente la generación de especies reactivas de oxígeno, la peroxidación lipídica, la pérdida de potencial de la membrana externa mitocondrial. Pariona *et al.* (2018) reportan que las Np's Cu a concentraciones de 0.5-1.0 mg/mL sobre *F. oxysporum.*, logran inhibir desde el 98-100%. Cerna-Chávez *et al* (2024) mencionan a una concentración del 1-5% de Np's Si con mezcla de extractos de gobernadora y mostaza obtuvieron una inhibición de a esporulación del 74.97-94.57% y 50.97-100%; cabe mencionar que no reportan el crecimiento micelial.

La investigación de González-Merino *et al.* (2021), muestran que las nanopartículas ZnO lograron rangos de inhibición de 30.8-83.3% a concentraciones de 100-3000 ppm; siendo la concentración de 1600 ppm donde se obtuvo la mayor reducción del crecimiento (83.3%). Estos resultados concuerdan con los obtenidos en esta investigación, ya que se obtuvieron reducciones del crecimiento de 83-89.9 % a partir de la aplicación de 500 ppm de Np ZnO. Se ha observado que al tratar con Np's ZnO a *Penicillium expansum* daños en conidios y estructuras distorsionada, lo cual inhibió la germinación y el desarrollo de conidios Wani y Shah (2012). Kalagatur *et al.* (2018), reportan que al aplicar Np's ZnO encapsuladas con quitosano lograron la disminución de ergosterol en *F. graminearum* en un rango de 3.94-95.7% al aplicar Np's ZnO en concentraciones de 100-600 ppm.

La tabla 5, muestra la concentración inhibitoria media (CI₅₀); siendo las Np's Zn donde se obtuvo la CI₅₀ más baja para el control de *F. equiseti.* con una concentración de 55.183 ppm, seguida por Np' Cu donde se obtuvo 217.508 ppm, y siendo las Np's Si las que obtuvieron la CI₅₀ mayor con 958.635 ppm.

Tabla 5. Estimación de la concentración inhibitoria media de las nanopartículas evaluadas en el ensayo *in vitro*

Np's	Cl ₅₀	Limites fiduciales		Ec. Predicción	R ²
		Inferior	Superior		
Cobalto	558.279	136.363	16650	y= -1.5932+0.5081x	0.9227
Cobre	217.508	77.887	577.935	y= -1.562+0.668x	0.9210
Silicio	958.635	342.447	9746	y= - 2.3672+0.7939x	0.9470
Zinc	55.183	23.934	97.537	y= -1.4227+0.8168x	0.3799

González-Merino *et al.* (2021) reportan una Cl₅₀ para las nanopartículas ZnO de 364.4 ppm; siendo esta concentración muy superior a la obtenida en esta investigación (55.18 ppm). Parada *et al.* (2024) mencionan que la concentración mínima inhibitoria para las Np's de CuO aplicadas a *Fusarium oxysporum* es de 160 ppm, la cual redujo significativamente la biomasa del hongo; cabe señalar que este valor es inferior al registrado en esta investigación. Malandrakis *et al.* (2021) reportan que la Cl₅₀ es de 997 µg/ml de Np's de CuO evaluadas en *F. solani*, lo que representa 4.6 veces más lo reportado en esta investigación; así mismo estos investigadores reportan una Cl₅₀ en *F. solani* de 554 µg/ml de Np's de ZnO, lo cual representa 10 más a la obtenida en esta investigación.

La tabla 5 muestra el efecto de las Np's sobre la severidad de *F. equiseti* en plantas de tomate cabe señalar que el tratamiento con mayor ABCPE fue el T. inoculado, seguido del testigo químico; aunque todos los tratamientos con Np's registraron una menor ABCPE que el testigo químico, no fue estadísticamente significativa, siendo que el Co 50 y Zn 75 los que registraron las menores ABCPE con una reducción de la severidad del 76.1% y 75.3% en comparación con el T. inoculado

Tabla 6. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad acumulada de plantas inoculadas con *F. equiseti*.

Tratamiento	ABCPE
Cu 50	10.917 ± 2.245 B
Cu 75	8.917 ± 1.020 CB
Co 50	7.333 ± 0.816 CB
Co 75	9.000 ± 2.000 CB
Si 50	11.083 ± 2.764 B
Si 75	11.583 ± 1.530 B
Zn 50	8.250 ± 2.230 CB
Zn 75	7.583 ± 1.428 CB
T Químico	16.500 ± 0.000 B
T Absoluto	0.000 ± 0.000 C
T Inoculado	30.667 ± 0.000 A
P- valor	<0.001

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

González-Merino *et al.* (2021), reportan una reducción de la severidad del 76-92 % al aplicar de 100-3000 ppm de Np's ZnO; coincidiendo con el rango la disminución del ABCPE obtenida en esta investigación. Las Np's de ZnO tienen una aplicación potencial como agente antifúngico y pueden ser utilizadas disminuir la diseminación de *F. oxysporum* en plantas de tomate, además de brindar un efecto relacionado con la actividad del Zinc como precursor en la síntesis de auxinas, citoquininas y biosíntesis de giberelinas, así como la inducción de una mayor actividad de enzimas antioxidantes útiles en respuesta al ataque de patógenos. La inducción del crecimiento de las nanopartículas de ZnO se puede atribuir a la actividad del zinc como micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de la planta; precursor de la producción de auxinas que promueven la división y elongación celular, así como tienen influencia en el ácido indol acético, que funciona como un estimulante hormonal; asociado a la biosíntesis de citoquininas y giberelinas; así como la inducción de mayor actividad antioxidantes útiles en la respuesta al ataque de patógenos.

Las Np's de Co lograron una reducción de la severidad del 70.6-76.1% menor al testigo inoculado; cabe mencionar que Sharma *et al.* (2017), logra una reducción de la infección de un 90.49% en plantas de chile inoculadas con *Fusarium oxysporum* tratadas con Np's CoFe_2O_4 . El-Said *et al.* (2023), reporta una inhibición en pudriciones de *F. oxysporum* en plantas de frijol de un 60-64.7% al aplicar 100 $\mu\text{g/L}$ Np's Co_3O_4 . Ogunyemi *et al.* (2023). En particular, las nanopartículas se unen a la superficie de las bacterias debido a fuerzas electrostáticas, lo que hace que la célula pierda la integridad de su membrana.

Tabla 7. Variables agronómicas de la evaluación en invernadero

Tratamiento	DT (mm)	LT (cm)	PT (gr)	LR (cm)	PR (gr)
Cu 50	4.651 \pm 1.739 BAC	0.896 \pm 0.741 A	85.83 \pm 91.36 BA	20.700 \pm 8.332 A	3.417 \pm 2.905 BA
Cu 75	5.131 \pm 0.898 BA	0.958 \pm 0.496 A	84.000 \pm 42.07 BA	22.217 \pm 7.914 A	4.167 \pm 2.562 BA
Co 50	5.643 \pm 1.133 BA	1.380 \pm 0.254 A	72.66 \pm 48.98 BA	28.933 \pm 13.546 A	8.833 \pm 6.145 A
Co 75	4.943 \pm 0.673 BAC	1.098 \pm 0.403 A	86.83 \pm 37.72 A	23.267 \pm 4.610 A	3.667 \pm 1.861 BA
Si 50	3.991 \pm 0.257 BC	0.678 \pm 0.274 BA	42.50 \pm 23.31 BA	18.467 \pm 6.408 A	2.333 \pm 1.032 B
Si 75	4.328 \pm 0.592 BC	1.010 \pm 0.237 A	61.50 \pm 22.45 BA	19.367 \pm 5.698 A	2.333 \pm 0.0816 B
Zn 50	5.213 \pm 0.574 BA	1.248 \pm 0.179 A	109.50 \pm 20.41 A	21.650 \pm 4.993 A	4.333 \pm 3.011 BA
Zn 75	5.718 \pm 1.032 BA	1.253 \pm 0.432 A	87.00 \pm 40.08 A	24.667 \pm 5.508 A	4.000 \pm 2.529 BA
T Químico	3.063 \pm 0.407 C	0.917 \pm 0.004 A	1.00 \pm 0 B	2.500 \pm 2.009 A	1.000 \pm 0 B
T Absoluto	6.486 \pm 1.238 A	1.048 \pm 0.499 A	95.66 \pm 63.21 A	28.717 \pm 6.194 A	6.667 \pm 4.412 BA
T Inoculado	5.256 \pm 1.150 BA	0.681 \pm 0.298 BA	44.50 \pm 19.66 BA	21.183 \pm 5.352 A	2.667 \pm 1.861 B
P-Valor	<0.0001	<0.0001	<0.0003	<0.0001	<0.0024

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). DT: Diámetro del tallo, LT: Longitud del tallo, PT: Peso del tallo, LR: Longitud de raíz, PR: Peso de raíz.

En la variable DT los únicos tratamientos que presentaron una diferencia significativa con el T. Absoluto, fueron T. Químico, Si 75 y Si 50. Cabe destacar que el Zn 75 y Co 50 lograron generar un diámetro superior de 8.8 % y 5.5 % en comparación al testigo inoculado. Ahmed *et al.* (2024) reporta un incremento en el diámetro del tallo en plantas del 14.7% al aplicar 75 y 150 $\mu\text{g/L}$ de Np's de ZnO.

Para la variable LT no se observa diferencia significativa entre los tratamientos (tabla 7) sin embargo Co 50 logra superar en un 31.7% la longitud del tallo del testigo absoluto. Para la variable LR no se observa diferencia significativa entre los tratamientos (ver tabla 7) sin embargo Co 50 logra superar en un 36.6 % la longitud de raíz del testigo inoculado y el Zn 75 logra un incremento del 16 % en comparación del testigo inoculado. Cabe mencionar López-Moreno *et al.* (2016), reporta un incremento en la LR de 30.2% al aplicar 100 mg/L de Np's CoFe_2O_4 ; los mismos autores reportan un incremento de LT superior al 20 % al aplicar 62.5 y 500 mg/L de CoFe_2O_4 . Siendo el Co esencial para la síntesis de vitamina B12 ha mejorado el desarrollo en plantas de maní y la calabaza, ya que el Co promueve el crecimiento en hojas, (número y peso) y raíces este aumento en el desarrollo de las plantas se puede deber a una reducción del envejecimiento de los tejidos, ya que el cobalto inhibe la actividad de la ACC oxidasa, así como reduce la producción de etileno en la planta aumenta el desarrollo de las plántulas Basu *et al.* (2006), Sarropoulou *et al.* (2016), Li *et al.* (2005).

Para la variable PT los tratamientos Zn 50, Zn 75 y Co 75 no muestran diferencia significativa con el testigo absoluto logrando un incremento del PT 146.1%, 95.5% y 95.1% en comparación con el PT del testigo inoculado (Tabla 7). Ucan-Tucuch (2023), reporta que la aplicación de 1000ppm, de Np's ZnO incrementan el peso fresco de plantas de pepino en un 3.2% en comparación del T. absoluto. Para la variable PR el mejor tratamiento fue Co 50 registrando un peso de 8.83 gr, logrando un incremento del 32.4% en comparación con el T. absoluto; logrando un peso 2.31 veces superior al del T. inoculado. Lo anterior coincide con lo reportado por Ha *et al.* (2020) quien al aplicar nanopartículas de Co a concentraciones de 3.1-6.2 $\mu\text{g/L}$ logro incrementos del peso fresco de la raíz en un 42.82-250 veces más que el testigo absoluto.

Tabla 8. Variables agronómicas de la evaluación en invernadero

Tratamiento	NBF	NRF	CT	N
Cu 50	10.500 ± 9.354 BAC	3.166 ± 2.228 BA	4.650 ± 3.815 BA	40.917 ± 3.394 A
Cu 75	10.500 ± 4.277 BAC	3.000 ± 0.894 BA	3.183 ± 2.556 BA	42.833 ± 3.576 A
Co 50	14.333 ± 4.501 BA	4.666 ± 0.816 A	5.867 ± 2.658 A	40.750 ± 0.058 A
Co 75	6.833 ± 3.970 BDC	2.166 ± 1.169 BAC	6.467 ± 2.920 A	40.950 ± 0.714 A
Si 50	3.667 ± 4.501 DC	1.500 ± 1.516 BC	5.750 ± 3.057 A	42.333 ± 2.042 A
Si 75	5.167 ± 2.136 DC	2.666 ± 1.751 BA	5.367 ± 2.425 A	41.583 ± 1.861 A
Zn 50	13.667 ± 4.131 BA	3.833 ± 0.983 BA	6.867 ± 2.122 A	41.017 ± 1.532 A
Zn 75	10.500 ± 6.316 BAC	4.000 ± 1.414 BA	6.683 ± 2.742 A	41.033 ± 0.643 A
T Químico	0.000 ± 0 D	0.000 ± 0 C	0.000 ± 0 B	0.000 ± 0 B
T Absoluto	19.000 ± 5.215 A	4.666 ± 1.505 A	6.200 ± 2.164 A	42.383 ± 1.856 A
T Inoculado	6.333 ± 2.160 BDC	2.500 ± 0.54 BAC	4.933 ± 2.223 BA	42.0083 ± 1.026 A
P-Valor	<0.0001	<0.0001	<0.0011	<0.0001

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). NBF: Número de botones florales, NRF: Número de racimos florales, CT: Clorofila total, N: Nitrógeno.

En la variable NBF los tratamientos Co50 y Zn 50 son estadísticamente similares al testigo absoluto logrando incrementar en 126% y un 115% el NBF en comparación con el testigo absoluto. Ucan-Tucuch (2023), reporta que la aplicación de 1000ppm, de Np's de ZnO incrementan el número de flores en pepino en un 13.4% en comparación del testigo absoluto; siendo que en esta investigación la aplicación de Np's ZnO incrementaron en un 65.9-116% el NBF.

En la variable CT las Np's de Co, Si y Zn mostraron ser estadísticamente similares al T. absoluto; logrando un incremento en la CT desde 8.8-39.2%, siendo el Zn 50 el que logro el mayor incremento en CT en las plantas inoculadas. Ha *et al.* (2020) reporta un incremento en la producción de clorofila de 10.3-20.8% al aplicar 4.65 y 6.2µg/L Np's de Co. Galindo-Guzmán *et al.* (2022) no reporta incremento significativo en la clorofila A al aplicar Np's de ZnO a concentraciones de 25-100 ppm; mientras que en la clorofila B se reporta un incremento significativo al aplicar las Np's de ZnO de 25-75µg/L alcanzando los niveles más altos de clorofila tipo B a 50µg/L. Escalona *et al.*, (2009) mencionan que las unidades Spad están directamente relacionadas con el contenido de nitrógeno en las plantas por lo cual en este estudio no se muestra diferencia para los tratamientos evaluados.

5.-CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que las evaluaciones de las Np's fueron eficientes en el control *in vitro* de *F. equiseti* siendo las Np's CuO y ZnO las que arrojaron las menores CI₅₀; cabe señalar que la aplicación de las Np's de CoO y ZnO fueron las que registraron el menor daño acumulado en plantas de tomate inoculadas con *F. equiseti*. En invernadero el CoO y ZnO mostraron la mayor eficiencia en las variables evaluadas, promoviendo un mejor desarrollo en las variables DT, LT, PT, LR, PR, NBF, NRF y CT.

6.-BIBLIOGRAFIAS

- Ahmed, M.; Marrez, D.A.; Rizk, R.; Zedan, M.; Abdul-Hamid, D.; Decsi, K.; Kovács, G.P.; Tóth, Z. La influencia de las nanopartículas de óxido de zinc y el estrés salino en las características morfológicas y algunas características bioquímicas de las plantas de *Solanum lycopersicum* L. *Plantas* 2024, 13, 1418. <https://doi.org/10.3390/plants13101418>
- Apodaca- Sánchez, M. A.-M.-E.-U. (2004). Pudrición de la corona del chile (*Capsicum annum* L.). *Revista Mexicana de Fitopatología*. Recuperado el 21 de Octubre de 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/612/61222104.pdf>
- Arredondo, S. S. (2017). *Centro de Estudios en Alimentos Procesados CEAP*. Recuperado el 20 de Julio de 2024, de Cultivo de tomate industrila en Chile: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6552/NR40564.pdf?sequence=6>
- Basu M, Bhadoria P, Mahapatra S (2006) Influence of microbial culture in combination with micronutrient in improving the groundnut productivity under alluvial soil of India. *Acta Agric Sloven* 87(2):435–444
- Beltrán, M. B. (2023). Primer Reporte de *Fusarium equiseti* Causante de Pudrición de la Raíz y la Corona en el Tomate en México. *APS Online Publications*. doi:<https://doi.org/10.1094/PDIS-10-22-2494-PDN>
- Cabrera, R. S.-F. (2019). Estrategias Para el Control del Hongo Fitopatogeno *Fusarium* en el Sector Agrícola: del Control Químico al Control Biológico. *Frontera Biotecnológica*. Recuperado el 10 de Octubre de 2024, de https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol12/pdf/vol_12_3.pdf
- Caceres, S. (2020). *Guía práctica para la identificación y el manejo de las plagas de tomate*. Recuperado el 13 de Julio de 2024, de Estacion Experimental Agropecuaria Bella Vista, INTA:

https://www.researchgate.net/publication/347987043_Guia_Practica_para_la_Identificacion_y_el_Manejo_de_las_Plagas_del_Tomate_2020

- Castillo Sanmiguel, P. A. (2022). Aspectos moleculares de la marchitez vascular del tomate (*Solanum lycopersicum*) por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y antagonismo por *Trichoderma* spp. *Revista mexicana de fitopatología*. doi:<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2106-1>
- Cerna, C. E. (2019). Evaluación in vitro de principios activos de origen botánico para el control de hongos fitopatógenos. *Scientia fungorum*. doi:<https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1245>
- Cerna, C. E. (2023). Evaluación in vitro de extractos vegetales adicionados con nanopartículas para el control de *Fusarium oxysporum*. *ECOSISTEMAS Y RECURSOS AGROPECUARIOS*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2024, de <https://scielo.org.mx/pdf/era/v10n2/2007-901X-era-10-02-e3224.pdf>
- Chávez, A. R. (2011). Control biológico y químico contra *Fusarium stilboides* en pimiento morrón (*Capsicum annum* L.) en poscosecha. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2024, de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1027-152X2011000200009&script=sci_arttext
- Díaz, F. P. (2019). CRECIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS POSTCOSECHA DE FRUTOS DE GENOTIPOS NATIVOS DEL TOMATE (*Solanum lycopersicum*). *Rev. Fitotec. Mex.*, 43. Recuperado el 26 de Septiembre de 2024, de <https://scielo.org.mx/pdf/rfm/v43n1/0187-7380-rfm-43-01-89.pdf#:~:text=Las%20variedades%20de%20tomate%20presentan%20una%20amplia%20diversidad%20de%20tama%C3%B1os>,
- El-Sayed, ES.R., Mohamed, S.S., Mousa, S.A. et al. Bifunctional role of some biogenic nanoparticles in controlling wilt disease and promoting growth of common bean. *AMB Expr* 13, 41 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13568-023-01546-7>

- EPPO. (2020). *Base de datos mundial de la Fiscalía Europea*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2024, de Base de datos mundial de la Fiscalía Europea: <https://gd.eppo.int/taxon/FUSAOX>
- Escalona, C. V. Alvarado, P. V. Monardes, H M. Urbina, Z. Martin A. B. (2009). BOLETIN INFORMATIVO. N.1 EL CULTIVO DEL TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.).
- Galindo-Guzmán, A. P.-H.-R.-G.-G. (2022). Chemical synthesis of zinc oxide nanoparticles and their evaluation in *Lactuca sativa* seedlings. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>.
- Gobierno de México . (2024). El jitomate, hortaliza mexicana de importancia mundial. *Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Recuperado el 19 de Enero de 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>
- González-Merino, A. H.-F. (Junio de 2021). Actividad antifúngica de nanopartículas de óxido de zinc en el sistema patológico de *Fusarium oxysporum*-*Solanum lycopersicum* en condiciones controladas. *Journal of Phytopathology*. Recuperado el 21 de Octubre de 2024, de Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles in *Fusarium oxysporum*-*Solanum lycopersicum* pathosystem under controlled conditions: Actividad antifúngica de nanopartículas de óxido de zinc en el sistema patológico de *Fusarium oxysporum*-*Solanum lycopersicum* en condiciones controladas
- Górniak, I., Bartoszewski, R. y Króliczewski, J. Revisión exhaustiva de las actividades antimicrobianas de los flavonoides vegetales. *Phytochem Rev* **18**, 241–272 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9591-z>
- Guédez, C. C. (2014). Actividad antifúngica del aceite esencial de naranja (*Citrus sinensis* L.) sobre hongos postcosecha en frutos de lechosa (*Carica papaya* L.). *SEMATIC SCHOLAR* . Recuperado el 10 de Octubre de 2024, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Actividad-antif%C3%BAngica-del->

aceite-esencial-de-L.)-en-Gu%C3%A9mez-
Ca%C3%B1izalez/91a5b8d0dfcf054dcf9a79edab04fff39ff54c7b#:~:text=El
%20AEN%20puede%20ser%20una%20alternativa%20factible%2C%20par
a,grandes%20perdidas%2

Kalagatur NK, Nirmal Ghosh OS, Sundararaj N and Mudili V (2018) Antifungal Activity of Chitosan Nanoparticles Encapsulated With *Cymbopogon martinii* Essential Oil on Plant Pathogenic Fungi *Fusarium graminearum*. *Front. Pharmacol.* 9:610. doi: 10.3389/fphar.2018.00610

Leslie JF, Summerell BA. Species descriptions. En: Leslie JF, Summerell BA, editores. *The Fusarium laboratory manual*. 11st edition Iowa: Blackwell Publishing; 2006, 388-121.

Letessier, M. P. (2013). Actividad antifúngica del aceite esencial de hisopo (*Hyssopus officinalis*). *Journal of Phytopathology*. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2001.00692.x>

Li, CZ Wang D, Wang GX (2005) The protective effects of cobalt on potato seedling leaves during osmotic stress. *Bot Bull Acad Sin* 46:119–125

Lira, R. L. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*. Recuperado el 2 de Octubre de 2024, de <https://www.redalyc.org/journal/416/41655593002/41655593002.pdf>

López-Moreno, M. L., Avilés, L. L., Pérez, N. G., Irizarry, B. Á., Perales, O., Cedeno-Mattei, Y., & Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of The Total Environment*, 550, 45–52. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.063

Ma, Y.; Lin, W.; Ruan, Y.; Lu, H.; Fan, S.; Chen, D.; Huang, Y.; Zhang, T.; Pi, J.; Xu, J.-F. Avances de nanomateriales de cobalto como agentes antiinfecciosos, portadores de fármacos e inmunomoduladores para el posible tratamiento de enfermedades infecciosas. *Farmacia* **2022**, *14*, 2351. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112351>

- Malandrakis, A. A. (2021). Metal nanoparticles: Phytotoxicity on tomato and effect on symbiosis with the *Fusarium solani* FsK strain. *Science of the Total Environment*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147606>
- Masoko, P., Picard, J., & Eloff, J. N. (22 de Abril de 2005). Actividades antifúngicas de seis especies sudafricanas de *Terminalia* (Combretaceae). *National Library of Medicine*. doi:doi: 10.1016/j.jep.2005.01.061.
- Monardes, H. (2009). *Manual de cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill): características botánicas*. Recuperado el 9 de Marzo de 2024, de Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill): características botánicas: http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/Manua_Cultivo_tomate.pdf
- Monge, J. E. (2021). *ResearchGate*. Recuperado el 07 de Julio de 2024, de Manejo integrado de plagas en tomate (*Solanum lycopersicum*) cultivado bajo invernadero: una experiencia: https://www.researchgate.net/publication/351391944_Manejo_integrado_de_plagas_en_tomate_Solanum_lycopersicum_cultivado_bajo_invernadero_una_experiencia
- Mota, R. M. (2021). Actividad Antifúngica in vitro de Nanopartículas de óxido de Zinc como Alternativa de Control de *Alternaria alternata*. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila. Recuperado el 23 de Marzo de 2024, de <https://repositorio.uaaan.mx/bitstream/handle/123456789/48013/K%2067211%20M%c3%a9ndez%20Mota%2c%20Rosalino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Obregón, V. (2014). Guía para la Identificación de las Enfermedades del Tomate en Invernadero. (1. ediciones, Ed.) *colección de recursos*. doi:978-987-521-550-4
- Ogunyemi, S. O. (2023). Cobalt oxide nanoparticles: An effective growth promoter of *Arabidopsis* plants and nano-pesticide against bacterial leaf blight

pathogen in rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114935>

Pariona, N. L. (2018). Síntesis de nanopartículas de cobre para el control de hongos fitopatógenos. *Revista ECI Perú*.
doi:<https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2018.0017/>

Ramos, C. E. (2018). ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA IN VITRO E IN VIVO DE NANOPARTÍCULAS DE Ag, CuO Y ZnO CONTRA BACTERIAS. *ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA IN VITRO E IN VIVO DE NANOPARTÍCULAS DE Ag, CuO Y ZnO CONTRA BACTERIAS*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN. Recuperado el 18 de Octubre de 2024, de <http://eprints.uanl.mx/16701/1/1080290331.pdf>

Ribeiro, S. M. (2019). La endo- β -1,3-glucanasa (familia GH16) de *Trichoderma harzianum* participa en la biogénesis de la pared celular, pero no es esencial para el antagonismo contra los patógenos de las plantas. *Biomoleculas*.
doi:<https://doi.org/10.3390/biom9120781>

Rios, H. T. (2021). Control biológico de *Fusarium oxysporum*, agente causal de la pudrición del cormo en gladiolo, mediante estreptomicetos. *Revista mexicana de fitopatología*. doi:<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2105-3>

Rodríguez, C. A. (2020). Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, una alternativa sostenible para la agricultura. *Abanico Agroforestal*. doi:
<http://dx.doi.org/10.37114/abaagrof/2020.7>

Sarropoulou V, Dimassi-Theriou K, Therios I (2016) Effect of the ethylene inhibitors silver nitrate, silver sulfate, and cobalt chloride on micropropagation and biochemical parameters in the cherry rootstocks CAB-6P and Gisela 6. *Turk J Biol* 40(3):670–683. <https://doi.org/10.3906/biy-1505-92>

- Shaner G, Finney RE (1977) The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-Mildewing resistance inknot wheat. *Phytopathology* 67: 1051-1056.
- Sharma, P. A. (2017). Fungicidas de nanomateriales: actividad antimicótica in vitro e in vivo de nanoferritas de cobalto y níquel sobre hongos fitopatógenos. *Wiley Online Library*. doi:<https://doi.org/10.1002/gch2.201700041>
- SIAP. (2023). *PANORAMA AGROALIMENTARIO 2023*. Recuperado el 23 de Junio de 2024, de Servicio de Informacion Agroalimentaria y Pesquera: <https://online.pubhtml5.com/vqdk/rvdl/>
- Slavin, Y.N.; Bach, H. Mecanismos de las propiedades antifúngicas de las nanopartículas metálicas. *Nanomateriales* 2022, 12, 4470. <https://doi.org/10.3390/nano12244470>
- Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154.
- Tinajero, R. S. (13 de Diciembre de 2021). Biocontrol in vitro de *Fusarium oxysporum* y *Dickeya chrysanthemi* con antagonistas. *Revista mexicana de fitopatología*. doi:<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-1>
- Ucan, O. T. (2023). IMPACTO DE MALTODEXTRINA Y NANOPARTICULAS DE OXIDO DE ZINC EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DEL PEPINO (*Cucumis sativus* L.). Tesis de maestria en Horticultura . Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado el 26 de Octubre de 2024, de <https://repositorio.uaaan.mx/bitstream/handle/123456789/49756/Ucan%20Tucuch%2c%20Omar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vázquez, R. L. (2017). MANEJO INTEGRADO DE LA MARCHITEZ VASCULAR DEL TOMATE [*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (SACC.) W.C. SNYDER & H.N. HANSEN]: UNA REVISIÓN. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262017000200014

- Vera, I. R. (2022). *Nanotecnología para la detección y control de enfermedades de cultivos agrícolas*. Recuperado el 2 de Octubre de 2024, de CIQA Centro de Investigación de Química Aplicada: <https://www.ciqa.mx/Nanobiotecnologia.aspx#:~:text=La%20aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20nanotecnolog%C3%ADa,sensores%20que%20facilita%20la%20productividad>
- Villa, M. A. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>
- Wani, A.H.; Shah, M.A. A unique and profound effect of MgO and ZnO nanoparticles on some plant pathogenic fungi. *J. Appl. Pharm. Sci.* 2012, 2, 40–44.