

Aplicación de nanopartículas metálicas como alternativa en Colombia para el control del “Mal de Panamá”: revisión

Giovanni Alberto Cuervo-Osorio^{1a} ; Diego Alberto Salazar Moncada² ;
Claudia Patricia Ossa-Orozco¹ 

¹Grupo de Investigación en Biomateriales, Programa de Bioingeniería, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Antioquia, Calle 67 No. 53 - 108, Medellín, Colombia.

²Universidad de Antioquia, Calle 67 No. 53 - 108, Medellín, Colombia.

^agiovanni.cuervo@udea.edu.co

Fecha recepción: septiembre 26 de 2023

Fecha aceptación: abril 23 de 2024

Resumen

El Mal de Panamá es una enfermedad que afecta a las plantaciones de bananos y plátanos. Es causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Raza 4 Tropical (conocido también como *Fusarium odoratissimum*). En la actualidad, dicha enfermedad es un problema que ha llamado la atención del sector agrícola en Colombia, puesto que genera una gran pérdida económica en las plantaciones afectadas. Los métodos de control de este hongo son fungicidas de origen químico, cuyos componentes pueden generar contaminación ambiental y resistencia del hongo, además del uso de nanopartículas metálicas, la cual es una opción innovadora frente a este problema. Es así como este trabajo se centra en una revisión del uso de nanopartículas metálicas para el control de dicho fitopatógeno, en Colombia y en el ámbito mundial. Se realizó una búsqueda bibliográfica referente del tema, consultando bases de datos como: Scopus, Google Scholar, y SCieLo, buscando artículos, patentes, libros, entre otros. Se identificaron diferentes estudios en los cuales se usaron nanopartículas metálicas para el control del hongo del género *Fusarium*; sin embargo, se evidenció el gran vacío que existe en Colombia y en el mundo, sobre estudios con nanopartículas metálicas en contra del hongo *Fusarium* sp. *oxysporum cubense* raza 4 tropical causante del mal de Panamá.

Palabras clave: *Fusarium oxysporum*; Mal de Panamá; Nanopartículas metálicas.

Application of metallic nanoparticles as an alternative in Colombia for the control of “Mal de Panama”: review

Abstract

Panama disease is a disease that affects banana and plantain plantations, caused by the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Race 4 Tropical (syn: *Fusarium odoratissimum*). Currently, it is a problem that has drawn the attention of the agricultural sector in Colombia, as it leads to significant economic losses. The fungus control methods are fungicides of chemical origin, whose components can generate environmental contamination and the fungus resistance of its antifungal action. Another alternative implemented is the use of metallic nanoparticles, which is an innovative approach to this problem. This study focuses on a review of the use of metallic nanoparticles for the control of this phytopathogen, in Colombia and the global scale. A literature search on the topic was conducted, consulting databases such as Scopus, Google Scholar, and SCieLo, looking for articles, patents, books, and other sources. Various studies were identified in which metallic nanoparticles were used to control *Fusarium* sp. fungi. However, a significant gap was observed both in Colombia and globally regarding studies involving metallic nanoparticles against *Fusarium* sp. *oxysporum cubense* Race 4 Tropical, the causative agent of Panama disease.

Keywords: *Fusarium oxysporum*; Panama disease; Metallic nanoparticles.

Aplicação de nanopartículas metálicas como alternativa na Colômbia para o controle do “Mal do Panamá”: revisão

Resumo

O mal do Panamá é uma doença que ataca as plantações de banana e banana da Terra, ela é causada pelo fungo *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Raça 4 Tropical (sin: *Fusarium odoratissimum*). Atualmente é um problema que tem chamado a atenção do setor agrícola na Colômbia, pois gera um grande prejuízo econômico. Os métodos de controle desse fungo são fungicidas de origem química, cujos componentes podem gerar contaminação ambiental e resistência do fungo à sua ação antifúngica. Outra alternativa implementada é a utilização de nanopartículas metálicas, que é uma opção inovadora para resolver este problema. É assim que este estudo se concentra em uma revisão do uso de nanopartículas metálicas para o controle do referido fitopatôgeno, na Colômbia e no mundo. Foi feita uma pesquisa bibliográfica ao respeito do tema, consultando bases de dados como: Scopus, Google Scholar e SCieLo, procurando artigos, patentes, livros, entre outros. Foram identificados diferentes estudos, nos quais nanopartículas metálicas são utilizadas para controlar o fungo do gênero *Fusarium* sp., porém, ainda existe uma grande lacuna na Colômbia e no mundo, no que diz respeito a estudos com nanopartículas metálicas contra o fungo *Fusarium* sp. *oxysporum cubense* raça tropical 4 causando o Mal do Panamá.

Palabras chave: *Fusarium oxysporum*; Mal do Panamá; Nanopartículas metálicas.

Introducción

En el sector agrícola, la producción de banano a nivel mundial está ubicada en el cuarto lugar por debajo del arroz, trigo y el maíz; sin embargo, es la fruta más exportada en términos de volumen [1,2]. Tres países de Latinoamérica dominan el 80% de exportación a la Unión Europea, entre ellos se encuentra Colombia, el cual ocupa el segundo lugar por debajo de Ecuador, quien es el líder mundial de exportaciones de este producto [3]. Este artículo de revisión se centra en aspectos relevantes relacionados con la enfermedad conocida como el Mal de Panamá y la pertinencia de la aplicación de nanopartículas metálicas como alternativa para su control.

La enfermedad del Mal de Panamá

Las plantaciones bananeras se ven afectadas por diferentes tipos de enfermedades, entre la que se encuentra la enfermedad conocida como Mal de Panamá o también llamada marchitez por *Fusarium* [4]. Ésta es causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (FocR4T) [5]. Se cree que este agente patógeno tuvo su origen en el sudeste asiático [4] y se ha propagado rápidamente a nivel mundial, siendo considerada altamente destructiva para las plantaciones. El primer hallazgo del hongo *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* se registró como la raza 1, patógeno que ha mutando y ha evolucionado hacia la raza 4. Dicha evolución hace que las plantaciones sean más vulnerables a ser infectadas, debido a que no tienen la capacidad de inhibir la acción del agente patógeno mutado [6].

No obstante, varios países han confundido esta enfermedad con el falso Mal de Panamá, que fue descrita por Deacon en 1985 [7,8]. La confusión se debe a que las plantas presentan síntomas similares, sin embargo, el falso Mal de Panamá no es considerada una enfermedad de alto riesgo para las plantaciones, sino una fisiopatía debido a encharcamientos, mal manejo del riego y la fertilización [6,9]. La aparición de la marchitez por *Fusarium* se ha registrado en diferentes países: en Australia apareció en 1876, en Ecuador en 1929, en la ciudad de Almirante en Panamá entre los años 1890 y 1910, de allí nace el nombre con el que se conoce en la actualidad [10].

La forma de propagación de este hongo en las plantas comienza por una penetración por la cofia de la raíz, luego se extiende por el ápice de esta, alcanzando el tejido vascular, hasta llegar

a las hojas y los frutos. En la planta se producen diferentes síntomas a causa de esta enfermedad, por ejemplo, las hojas pueden permanecer verdes hasta que el peciolo se dobla y colapsa, las hojas pueden presentar un color amarillo en los bordes, este síntoma se propaga de las hojas adultas a las más jóvenes [11]. En el interior de la planta se producen manchas o rayas marrones en los vasos situados en la cara interior de las láminas foliares del pseudotallo, en el rizoma de la planta se presenta una decoloración vascular, la cual se torna de una tonalidad rojiza a marrón oscuro, que es más evidente en la zona de densa vascularización [5].

Los síntomas antes mencionados se perciben aproximadamente entre los 5 y los 6 meses después de la siembra [11]. Se ha logrado observar que las plantas jóvenes son más susceptibles a este tipo de hongo. La enfermedad se puede propagar dentro de las plantaciones debido a varios factores como lo son: el suelo, agua, herramientas, ropa, botas, material de siembra entre otras [11]. El mayor problema que ocasiona esta enfermedad es que los frutos producidos son pequeños y sin valor comercial, lo que conlleva a grandes pérdidas a nivel económico.

Hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (syn: *Fusarium odoratissimum*)

Este tipo de género pertenece a un grupo de hongos filamentosos y cosmopolitas. Taxonómicamente se clasifica en la división *Ascomycota*, de la clase *Sordariomycetes*, del orden *Hypocreales*, perteneciente a la familia *Nectriaceae*, del género *Fusarium*, de la especie *F. oxysporum* y clasificado en la sub especie *F. oxysporum* f sp. *cubense*. Una de sus principales características es que presenta conidios en forma de canoa o plátano [12]. Este hongo tiene la capacidad de crecer hasta temperaturas cercanas a los 37 °C. Son considerados hongos de campo por los daños ocasionados en diversas plantaciones, teniendo la capacidad de sobrevivir en el suelo como micelio o como esporas cuando no tiene un anfitrión donde hospedarse. No obstante, en el año 2018 se clasificó el *Fusarium* raza 4 como *Fusarium odoratissimum*, según el estudio realizado por Maryati *et al.* [13], debido a la tabicación de sus macroconidias (0 a 6 septadas) y microconidias (0 a 3 septadas), las cuales no son características comunes para *Fusarium oxysporum*; sin embargo, en los reportes analizados en esta revisión, se evidenció que se sigue atribuyendo el mal de

Panamá al hongo *Fusarium oxysporum cubense* raza 4 [14,15], y no al descrito en el estudio de Maryani *et al.* [13].

Las variedades del *Fusarium oxysporum*, afectan varios tipos de plantaciones como por ejemplo cultivos de tomates, papas, melones y bananos, entre otros [16]. Este agente patógeno es transmitido por el suelo, causando un daño vascular en las plantaciones [17]. La interacción entre el hospedero y el hongo es de tipo hemibiotrofa, al inicio se genera una relación biotrófica, posteriormente se da la muerte de tejido del huésped, debido a una relación necrotrofica [2,18,19].

El hongo *Fusarium oxysporum cubense*, tiene cuatro tipos de razas que atacan diversas clases de bananos, por ejemplo la raza 1, afecta los bananos del tipo AAA, ABB y ABB como lo son los tipos 'Gros Michel', 'Pome', 'Pisang Awak', respectivamente; la raza tipo 2 ataca al tipo ABB como el 'Bluggoe', la raza 3 provoca efectos leves sobre las plantaciones. Sin embargo, ya no hace parte de Foc, la raza tropical 4 (TR4), es la que está provocando más diseminación a nivel mundial puesto que ataca a los bananos de tipos *Cavendish*, además, de todas las variedades que se mencionaron anteriormente, es decir su rango de propagación es mucho mayor, considerándose el patógeno más destructivo para las plantaciones bananeras [18]. Se estima que para el año 2070, se dará un incremento del 50 % en el área sembrada de banano y plátano [18], haciendo necesario buscar alternativas para controlar o inhibir, la presencia del *Fusarium*.

Propagación del Mal de Panamá en el mundo

La aparición de este hongo tuvo su primer reporte en el sureste asiático en 1967, pero fue solo hasta 1977 donde se verificó mediante pruebas de patogenicidad su existencia. En 1962, Couard y colaboradores [10] plantearon la hipótesis de la posible ruta de propagación de esta enfermedad, originándose en América y dándose su ingreso por Martinica y Jamaica; para extenderse posteriormente a América Central y diseminarse hasta América del Sur.

Es apenas en 2013 que se reporta su llegada al oeste africano. La raza 1 llegó a América Central a mediados del siglo XX [10], por esto se sustituyeron

las plantas por una variedad más resistente conocida como *Cavendish*; sin embargo, con la aparición del Foc R4T, se observó que este tipo de banano también era susceptible a ser invadido por este patógeno. Para el año 2019 dicho hongo se encontraba en pocos países, como se observa en el mapa de la Figura 1, donde aparecen los países con presencia de la R4T, no obstante, en 2023 la presencia de este hongo se encontró en más de 135 países [10,20], hecho que es de gran importancia y preocupación, debido a las graves consecuencias que trae para los cultivos y que genera un gran reto para disminuir su propagación en el mundo.

Consecuencias ocasionadas por el Mal de Panamá

En las décadas del 50 y 60 del siglo pasado, debido al Mal de Panamá, se produjo a nivel mundial la mayor pérdida tanto económica como de terreno óptimo para la siembra del banano, por ejemplo, en Ecuador se estimaron pérdidas en alrededor de 170 000 hectáreas [10]. Producto de la diseminación de esta enfermedad en las regiones agrícolas de Taiwán, antes de 1970, habían más de 50 000 hectáreas de banano, pero a inicios de dicha década esta cifra se redujo hasta 5 000 hectáreas. Se estima que las pérdidas ocasionadas en América debido a la raza 1 fueron cercanas a US \$2300 millones. Por otro lado, en Indonesia la raza 4 destruyó 8 millones de plantas, en China en el periodo de 2006 a 2010 se infectaron más de 40 000 hectáreas; caso parecido le sucedió a Filipinas que pasó de 700 hectáreas afectadas en 2005 a 15 000 para el año 2007. Las pérdidas económicas estimadas para el continente africano y Oceanía son de aproximadamente US \$10 000 000 [21].

La aparición de esta enfermedad obligó a la industria bananera a cambiar los cultivos de banano de la variedad *Gros Michel*, por una variedad resistente al *Fusarium oxysporum cubense* sp.; sin embargo, en diferentes estudios se ha demostrado la aparición de nuevas razas del Foc, lo que conlleva que las actuales variedades de banano sean susceptibles a esta enfermedad, y se sugiere que la resistencia de las nuevas variedades de bananos sea menor a 10 años [20].



Figura 1. Distribución para el año 2019 del *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* R4T a nivel mundial [21].

Mal de Panamá en Colombia

En Colombia el sector agrícola ocupa el séptimo lugar en contribución al PIB con un 6,9% [22] y los productos que mayor aportan a este porcentaje gracias a la cantidad de exportaciones son el café, el banano y aceite de palma, respectivamente, que suman un 83,7% del total de exportaciones de este sector [23]. Antioquia es el principal exportador de banano en Colombia, generando ingresos al país por más de 1000 millones de dólares [24,25].

El primer registro de la aparición del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 4 en el país fue en el año 2019, en el departamento de la Guajira, el cual proliferó en 190 hectáreas [26], produciendo una disminución en los indicadores de exportación [21], además, de generar una gran preocupación y alarma a nivel nacional en el sector bananero. Por lo cual, la Asociación de Bananeros de Colombia Augura y el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), emitieron una alarma a nivel nacional, esta última entidad decretó alerta roja [27]. Desde esa fecha, se ha incrementado el control y la implementación de métodos de prevención en las diferentes zonas donde se tienen este tipo de plantaciones. Es evidente que, al no tener un método de control a nivel mundial, tampoco existe en Colombia; por lo cual se ha optado por abordar el tema recurriendo a campañas de prevención.

Debido a la aparición de este hongo, se tuvieron que erradicar 168 hectáreas infectadas, generando pérdidas por US \$3 millones aproximadamente [28],

y despidos de más de 600 empleados, es así como surge otra problemática puesto que los cultivos de bananos son la fuente de ingresos de muchos habitantes de las zonas de cultivo [29], específicamente en Colombia, la mayor producción está en la zona de Urabá. Como se puede evidenciar, esta enfermedad ha generado un impacto negativo considerable sobre la economía de los países, hasta tal punto que se han tenido que eliminar cultivos de bananos para ser reemplazados por variedades más resistentes, sin embargo, el Foc R4T al no tener un medio de control, o una variedad de banano resistente a él, hace que su potencial sea mucho más peligroso y devastador para la industria bananera a nivel mundial.

Métodos de control del hongo *Fusarium* sp.

El principal método de control del hongo *Fusarium* es la prevención, esto se hace mediante aplicación de fungicidas en el suelo como por ejemplo Prochloraz y Propiconazol [30]. Iniciar los cultivos en terrenos libres de la enfermedad, trae consigo mayor posibilidad de éxito. También existen principios básicos para la prevención los cuales son exclusión o erradicación del patógeno, escape de la infección, desarrollo y uso de la resistencia genética [11]. Sin embargo, estas campañas de prevención deben ir acompañadas de una buena socialización entre las personas que manejan el sector agrícola, desde el campesino que cosecha hasta los exportadores.

Como se mencionó en el texto, cuando se detectó la primera clase del hongo *Foc* se procedió a eliminar los cultivos y fueron sustituidos por una variedad de banano resistente a este; no obstante, el control de este fitopatógeno es complejo debido a su alta resistencia, y su capacidad de mutar [11], también es un hongo que puede permanecer latente durante largos periodos en el suelo [31]. Uno de los métodos es el uso de plaguicidas químicos entre los cuales se tiene el Benomil 50 WP, Bavistin 500 SC, entre otros; estos han demostrado gran capacidad de inhibir la aparición de este hongo en las plantaciones, sin embargo, son ineficientes cuando ya las plantaciones se encuentran afectadas [11,32]. Además, el uso de este tipo de productos genera efectos adversos tanto en los terrenos, eliminando la microbiota del suelo, como en la salud de los seres humanos [33]. Cabe resaltar, que se ha demostrado que estos hongos adquieren con el tiempo resistencia a los fungicidas [34].

Es por esto que se ha incursionado en nuevos productos de tipo biológico para el control del hongo *Foc*, entre los cuales se ha encontrado el uso de aceites esenciales naturales, como el de clavos *Eugenia aromática*, de canela *Cinnamomum verum*, entre otros, que han tenido una alta respuesta en contra este patógeno incluida la raza 4 [11]. También se han usado diferentes tipos de microorganismos como el *Trichoderma* y *Candida incommunis*, estos ayudan a las plantaciones a adquirir resistencia para diferentes tipos de hongos [33,35]. Otro método que ha generado grandes expectativas es el uso de la nanotecnología, en especial de las nanopartículas metálicas, debido a que se ha demostrado la capacidad antibacteriana y antimicótica de los metales como una propiedad intrínseca de los mismos. Se pueden encontrar diferentes estudios donde se evalúan nanopartículas de plata, cobre, oro, entre otros, las cuales han tenido una tasa alta en la inhibición del hongo *Fusarium* [36,37].

Nanopartículas metálicas como sistema de control

Nanopartículas y tipos de síntesis

Los desarrollos en nanotecnología han permitido obtener diferentes tipos de nanopartículas metálicas, con el fin de ser implementadas en diversos sectores, específicamente en el sector agrícola. Este tipo de nanomaterial ha generado una gran revolución [38], en específico para el

control de varios hongos, entre los cuales se encuentran los hongos del género *Fusarium*. Se han sintetizado diferentes nanopartículas metálicas, tales como nanopartículas de plata, cobre, oro, zinc, entre otras, mostrando alta capacidad inhibitoria contra el hongo del género *Fusarium* [39,40].

Las nanopartículas metálicas pueden ser obtenidas mediante diferentes tipos de síntesis, las cuales se pueden agrupar en dos niveles, los métodos de arriba hacia abajo (*top-down*) o de abajo hacia arriba (*bottom-up*). El método *top-down* consiste en la subdivisión de manera mecánica del metal hasta alcanzar tamaños nanométricos, para esto se usan procesos como: el desgaste, la molienda y la evaporación térmica. En este último proceso se calienta el metal en una cámara de vacío, posteriormente se condensa el vapor generado haciendo que este se deposite sobre una lámina fría, formando nanopartículas. Otra técnica es la deposición en fase vapor, en la cual se descompone el material en compuestos volátiles, generando películas delgadas de nanopartículas [41]. El método *bottom-up* es el más usado en la actualidad, también conocido como método coloidal, consiste en la formación de nanopartículas metálicas mediante la unión de átomos del metal. Este método se clasifica en síntesis química o síntesis verde, en la primera se usan agentes químicos como por ejemplo el citrato trisódico para realizar la reducción de sales metálicas a nanopartículas metálicas; sin embargo, este tipo de síntesis genera subproductos que tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente. Por su parte, en la síntesis verde se usan materiales de origen biológico o naturales, como lo son extractos de plantas, hongos, polímeros naturales, por ejemplo, la fibroína de seda, por lo general estos materiales poseen capacidad antioxidante [41–44]. Este método es amigable con el medio ambiente, además, es rentable y se puede reproducir a gran escala [46].

Existen otros métodos de síntesis que han venido tomando gran importancia en la obtención de nanopartículas metálicas, entre los cuales está la reducción fotoquímica y radioquímica. Este tipo de síntesis requiere de una fuente de energía, en la primera técnica energías alrededor de los 60 eV y la segunda alrededor de los 104 eV. Estas técnicas son generalmente usadas para la obtención de nanopartículas a partir de metales nobles, adicionalmente tiene una ventaja respecto a la síntesis química y es que no se generan

impurezas o subproductos producidos por el uso de agentes químicos. Cabe resaltar que también se realizan síntesis usando radiación con microondas, no obstante, no se puede tener un control en la morfología de las nanopartículas, como si se puede tener con la mayoría de técnicas *bottom-up* [41]. Se puede evidenciar que existen diferentes técnicas para la síntesis de nanopartículas metálicas, las cuales son usadas en la actualidad a nivel industrial, además, se observa que este tipo de material se está ensayando en el campo agroindustrial [46,47].

Mecanismo de acción de las nanopartículas metálicas

El mecanismo de acción de las nanopartículas metálicas tanto en hongos como en bacterias ha sido estudiado en diferentes investigaciones; no obstante, aún no está totalmente definido [48-50]. Una de las teorías establece que se debe a interacciones electroestáticas que se dan debido a la unión de la membrana celular de los microorganismos cargados negativamente con los iones de plata que poseen carga positiva, de esta manera se genera un daño directo sobre la membrana celular de las bacterias o en la membrana plasmática para el caso de los hongos; lo que induce a cambios estructurales, volviendo permeable a la membrana y propiciando un efecto tóxico, debido a la pérdida de componentes intracelulares [51,52]. Otro mecanismo sugerido está relacionado con los iones de plata presentes en las nanopartículas metálicas, se propone que estos, interrumpen la cadena respiratoria de las mitocondrias celulares y la síntesis del adenosín trifosfato (ATP), lo que conlleva a una disminución de la fuente de energía de las células, afectando así la adhesión y proliferación celular, causando así la muerte de los microorganismos [51,52]. Adicionalmente, se propone otro mecanismo de acción de las nanopartículas metálicas, el cual está relacionado con la afectación del ácido desoxirribonucleico (ADN) y su replicación. Se plantea que cuando las nanopartículas se encuentran al interior de las células, interactúan con el nitrógeno exocíclico que se encuentra en las bases de adenina, guanina y citosina presentes en el ADN afectando su funcionalidad [51,52].

Factores que influyen en las propiedades antimicrobianas

Es fundamental tener en cuenta que la capacidad antibacteriana y antimicótica de las nanopartículas

metálicas se atribuyen a diferentes factores como lo son el tamaño, morfología, distribución y a su concentración [16, 53–56]. Las nanopartículas metálicas se pueden sintetizar con diferentes morfologías como por ejemplo esféricas, pseudoesféricas, piramidales, octaedros, entre otras [45,56], dicha morfología tiene una incidencia directa sobre la capacidad antimicrobiana de las nanopartículas metálicas. En el estudio realizado por Pal *et al.* [57], se sintetizaron nanopartículas de plata con geometría triangular, en forma de barras y esferas; se observó que las que tenían geometría triangular presentaban mayor capacidad antimicrobiana en comparación con las barras y las esferas, la hipótesis planteada fue que este tipo de nanopartículas tiene una mayor relación superficie-volumen. Además, debido a la cristalografía y a sus planos basales su geometría ofrece un mejor comportamiento antimicrobiano [57]. Por otro lado, en la investigación realizada por Raza *et al.* [58], se mostró que las nanopartículas de forma esférica tenían un mejor desempeño que las nanopartículas con forma triangular. Al analizar los resultados encontrados en los diferentes estudios, se puede observar que no se llega a un consenso sobre cuál es la mejor morfología, sin embargo, si se puede concluir que si existe una variación en la capacidad antimicrobiana según la morfología de las nanopartículas.

Los estudios que evaluaron nanopartículas específicamente en hongos también confirman lo anteriormente expuesto. Por ejemplo, el estudio realizado por Wani *et al.* [59], ensayaron nanodiscos y nanopartículas poliédricas de oro contra el hongo del género *Candida*, y evidenciaron que los nanodiscos tenían una acción más fuerte en la inhibición del crecimiento del hongo con respecto a las nanopartículas poliédricas. Otro estudio que demuestra la incidencia de la geometría sobre el crecimiento de algunos hongos fue el elaborado por Pariona *et al.* [60], en el cual analizaron el efecto de nanopartículas de plata con geometría de plaquetas y varillas, contra diferentes géneros de hongos, mostrando que las que tenían forma de plaquetas tenían un mejor desempeño inhibiendo el crecimiento micelar.

Por otro lado, se ha evidenciado que el tamaño de las nanopartículas es de gran importancia. Diferentes estudios han demostrado que al disminuir el tamaño de estas se incrementa su capacidad antimicrobiana; lo que indica una relación inversa donde a menores tamaños mayor es el área superficial de contacto con los

microorganismos, y de manera adicional, podría existir mayor facilidad para que las nanopartículas penetren las membranas y paredes celulares [56]. En el estudio realizado por Ivask *et al.* [61], se estudió el comportamiento de nanopartículas de plata (AgNPs) contra *Escherichia coli*, encontraron que el tamaño donde se presentaba mayor inhibición era alrededor de 10 nm. Por su parte, el estudio efectuado por Raza *et al.* [58], en el cual también evaluaron AgNPs contra cepas de *Escherichia coli*, lograron evidenciar que el tamaño con mayor inhibición estuvo en el rango de los 15 a 50 nm; cabe destacar que, en los diferentes estudios se confirma que disminuir el tamaño de partícula mejora la capacidad antibacteriana [58,62]. Sin embargo, no existe un consenso científico de cuál es el tamaño ideal para aplicaciones antimicrobianas.

Para hongos se ha demostrado que tamaños de partículas inferiores a los 50 nm tiene una alta incidencia sobre el comportamiento antifúngico, tal como lo muestra el estudio realizado por Montero *et al.*, en el cual evaluaron nanopartículas de cobre (CuNPs) en contacto con un hongo del género *Fusarium* mostrando deformación de las hifas del hongo, internalización de las nanopartículas dentro de las células, y alteración en la permeabilidad de la membrana celular [50]. Este hecho es confirmado por el estudio desarrollado por Shaban *et al.* [63], en el cual evaluaron nanopartículas de óxidos de zinc con un tamaño entre los 25 a 40 nm contra los hongos *Aspergillus niger* y *Proteus vulgaris*, mostrando una disminución en el crecimiento micelar de estos.

Por último, en diferentes estudios se sugiere que al aumentar la concentración de las nanopartículas se aumenta su capacidad antimicrobiana, debido a que se genera un mayor contacto de los microorganismos con las nanopartículas [63,64]. Por lo cual, deben verificarse diversas concentraciones y determinar el porcentaje inhibitorio frente a los microorganismos.

Investigaciones con nanopartículas metálicas

Dentro de las nanopartículas metálicas, están las nanopartículas de cobre (CuNPs), que han sido evaluadas como método de control del hongo *Fusarium*. Un estudio realizado por Saito *et al.* [50] demostró que las nanopartículas de cobre lograban inhibir a diferentes especies de hongos fitopatógeno como, *Phoma destructiva*, *Curvularia*

lunata, *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum*, *Penicillium italicum*, entre otros; sin embargo, en los resultados se pudo observar que las nanopartículas que tenían mejor efecto eran las de 170 nm, en comparación con las de 7 nm. En este estudio no se obtuvieron partículas esféricas sino romboédricas [50], lo cual puede disminuir la actividad antifúngica debido a la morfología.

Pham *et al.* [65] demostraron que al aumentar la concentración las CuNPs se obtenían mejores resultados en la inhibición del hongo; en este estudio se analizaron tres concentraciones diferentes, las cuales fueron 5, 10 y 20 ppm, con un tamaño de partícula de 53 nm; resultando que la concentración más alta presentó el mayor efecto inhibitorio. Este resultado se puede atribuir a que, como ya ha sido mencionado, al tener mayor cantidad de nanopartículas en contacto con el hongo, se propiciaba una mayor inhibición de este. Chrysikopoulos *et al.* investigaron como afectaban las nanopartículas de cobre a una plantación de tomates, lograron sintetizar nanopartículas de un tamaño de 25 nm, se observó que había una reducción del crecimiento del hongo *Fusarium*; sin embargo, se evidenció que estas nanopartículas afectaban el crecimiento de la planta [49]; por otro lado, en el estudio efectuado por López *et al.* [66], sintetizaron CuNPs mediante métodos verdes para su aplicación en plantaciones de aguacate; este estudio pretendía observar si existía alguna alteración de la planta al estar en contacto con estas nanopartículas, evidenciando que no hubo ningún cambio en las plantas. No obstante, se debe tener control en cómo es el contacto de la planta con dichas nanopartículas, su proceso de liberación y si existe alguna alteración en el fruto. Otros estudios se han centrado en el uso de nanopartículas de plata (AgNPs), como por ejemplo, en el control de los hongos micotoxigénicos *A. flavus* y *A. ochraceous*. En un estudio realizado por Khalil *et al.* [67] obtuvieron nanopartículas de plata con forma esférica con un tamaño entre los 6 y 26 nm y se demostró una alta capacidad antimicótica; esto se relaciona al anclaje de las nanopartículas en la membrana celular en diferentes sitios, logrando perforaciones en la misma lo que provoca una fuga de proteínas y de ADN de las células fúngicas. Cabe resaltar que al igual que en las nanopartículas de cobre, a menor tamaño de las nanopartículas, se propicia un efecto más fuerte en la inhibición del hongo [67].

Dawoud *et al.* [36] sinterizaron nanopartículas de plata con un tamaño entre los 3 y 13 nm, mostrando que este tamaño lograba disminuir considerablemente el crecimiento del hongo del género *Fusarium*; también, probaron que el aumento de la concentración de éstas aumentaba en gran manera el efecto sobre dicho hongo, corroborando así lo enmarcado por los diferentes autores; es de notar, que la concentración usada en este estudio fue de 200 ppm, la cual se puede considerar alta con respecto a lo investigado por otros autores. La disminución en el crecimiento en el hongo es atribuida a las altas concentraciones de nanopartículas y estas se adhieren a las hifas de los hongos, alterando así las células de los mismos, esto debido a que los iones de Ag^+ que afectan las funciones enzimáticas asociadas a la membrana del hongo, además, de la afectación en la expresión de algunas proteínas y enzimas lo que genera una alteración en la replicación del ADN [36].

Otra investigación donde se trabajó con un hongo del género *Fusarium*, fue el estudio efectuado por Liu *et al.* [16], quienes buscaban determinar el mecanismo de acción de las nanopartículas de plata sobre el hongo *Fusarium solani*. Los resultados demostraron que aun a bajas concentraciones se lograba tener unas tasas altas en la inhibición del hongo, y ocurría una apoptosis dado que se interfería con el metabolismo de la generación de energía y las sustancias. Este estudio, permitió comprender lo que sucede en las células de los hongos al interactuar con las nanopartículas de plata, además, de observar por qué estos nanomateriales tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de diferentes hongos y microorganismos.

Mientras que Rasmiya Begum *et al.* [68] mostraron en su estudio que este tipo de nanopartículas lograban tener un porcentaje de inhibición el *Fusarium oxysporum* de 85%; en este mismo estudio, se documenta como las AgNPs ayudan a la germinación de semillas, reduciendo el tiempo de germinación cuando estas semillas son tratadas con diferentes concentraciones de AgNPs; las nanopartículas rompen y penetran la cubierta de las semillas, liberando iones que promueven el crecimiento [67]. Estos resultados permiten ver a las AgNPs desde otra perspectiva, puesto que se habían catalogado siempre como perjudiciales para las plantaciones.

Si bien la mayoría de los estudios se centran en nanopartículas de plata y cobre, existen algunos estudios en donde se evalúan otros tipos de

metales como por ejemplo el bario. Thakur *et al.* [68] realizaron la evaluación de nanopartículas de bario con un tamaño promedio de 70 nm, sobre la inhibición de diferentes tipos de hongos entre ellos *Fusarium oxysporum* y *Alternaria alternata*. Los resultados arrojados demostraron que se lograba una inhibición de 77 % en el crecimiento del micelial, este porcentaje se alcanzó a la concentración máxima estudiada que fue de 600 mg/L. En la investigación realizada por Fujikawa *et al.* [69], analizaron el comportamiento de plantaciones de tomate, previamente tratadas con nanopartículas de óxido de magnesio, el cual es un óxido metálico. Este estudio obtuvo resultados prometedores al generar inmunidad contra el hongo del género *Fusarium* que ataca este tipo de plantaciones [69]. Estos estudios demuestran, que existen otros tipos de metales que poseen la capacidad de inhibir diferentes tipos de agentes patógenos, entre los que se encuentra el hongo del género *Fusarium*. Por lo que, se puede considerar estos nanomateriales como una alternativa para el control de dicho hongo. Por otro lado, otras nanopartículas que han sido estudiadas son las de oro, Batiha *et al.* [71] obtuvieron nanopartículas con un tamaño entre los 10 y 50 nm con formas variadas. Los resultados demostraron una alta capacidad inhibitoria en microorganismo como el *E. coli*, además, de muy buenas propiedades antifúngicas en contra del hongo *Fusarium sp.* [71]. Por otra parte, Mahalingam *et al.* concluyen en su estudio que las nanopartículas de oro tiene alta capacidad antimicrobiana, lo cual lo adjudican a un menor tamaño de nanopartícula [72]. Estos resultados corroboran lo expuesto para las diferentes nanopartículas metálicas; en donde, el factor común es que al disminuir el tamaño de estas se potencializa la capacidad antimicrobiana y antimicrobiana.

En la investigación efectuada por Kaur *et al.* [37], se utilizaron nanopartículas de plata, cobre y zinc, mezcladas con quitosano, este polímero tiene propiedades antimicrobianas, con lo cual se plantea la hipótesis de generar una sinergia entre los dos materiales, generando así un compuesto con una capacidad antimicrobiana mucho mayor. Se evaluó dicho compuesto en la especie de *Fusarium sp.* que ataca a los cultivos de garbanzos; el tamaño de partícula aplicada estaba alrededor de los 20 nm. Se evidenció que el compuesto que obtuvo mejores resultados fue el que poseía nanopartículas de cobre-quitosano con un 44,67 %

de inhibición, seguido de zinc-quitosano con un 40 % y por último plata-quitosano con un 33,33 %; sin embargo, cabe destacar que el compuesto con menor eficacia para la inhibición del hongo, posee un potencial mayor que el porcentaje de los fungicidas tradicionales [37]. Este estudio no solo demuestra la capacidad antimicótica de las diferentes nanopartículas metálicas, sino que también abre una nueva perspectiva para el uso de polímeros naturales que potencien la capacidad antibacteriana y antimicótica de las nanopartículas metálicas.

Se puede evidenciar como en los diferentes estudios las nanopartículas metálicas tienen una gran capacidad inhibitoria sobre el crecimiento, proliferación y propagación de diferentes tipos de hongos, en especial se logró mostrar el comportamiento antimicótico de las nanopartículas metálicas sobre el hongo del género *Fusarium*, el cual es el causante del mal de Panamá.

Afectaciones debido al uso de nanopartículas metálicas

Si bien las nanopartículas tienen buenas propiedades para el control de microorganismos patógenos, estas también presentan efectos negativos que se deben tener en cuenta, como por ejemplo, la afectación de microorganismos y macroorganismos benéficos para el suelo; sin embargo, el estudio realizado por Villamor [73], se evidenció que las lombrices no se veían afectadas por concentraciones de AgNPs inferiores a 94 mg/kg del suelo. Wang *et al.* [74] sugieren que los suelos tratados con AgNPs no representan un peligro para diferentes macroorganismos. No obstante, otros estudios contradicen dichas investigaciones, uno de ellos indica que los animales podrían tener afectaciones, debido a la transferencia trófica propiciada por la biomagnificación o bioacumulación de nanopartículas metálicas [75], esto puede producir en ellos anemia, retraso del crecimiento y cambios degenerativos en el hígado [76]; esta afectación, está relacionada con estar expuestos a cantidades significativas de nanopartículas metálicas o por tiempos muy prolongados. Por otro lado, Tortella *et al.* [77], en su revisión, muestran que cuando las nanopartículas de plata están embebidas en una matriz, se disminuía considerablemente el efecto sobre nematodos y lombrices, debido a la liberación controlada de las nanopartículas.

Por otro lado, la acumulación de metales pesados es otra problemática a tener en cuenta, debido a

las consecuencias ambientales que genera para la humanidad. Por esta razón, se han realizado diferentes estudios buscando la bioremediación de los suelos y fuentes hídricas [78-80]. Uno de estos metales es la plata, la cual es usada en diferentes formas, sea en pesticidas, aerosoles, lodos con plata, industria textil, entre otros [81]. En el suelo se puede encontrar una concentración de plata entre 0,01 y 5 mg/kg; sin embargo, se estima que en suelos cercanos a un yacimiento de plata, estos niveles pueden aumentar entre 20 y 257 veces más que en suelos comunes [82].

La alteración de la red alimentaria de los suelos es uno de los riesgos que pueden sufrir las zonas de aplicación de nanopartículas metálicas debido a la acumulación, lo que conlleva a un desequilibrio ambiental; además, dichas nanopartículas pueden llegar a fuentes hídricas debido a la escorrentía del suelo. Entre los pocos estudios realizados a escala de laboratorio en la acumulación de plata, se encuentra el realizado por Nguyen *et al.* [83], en el cual evidencian que las lombrices cuando eran expuestas por un mayor tiempo a AgNPs, lograban atenuar los efectos producidas por estas dado a que generaban un mecanismo de defensa nanopartículas (NPs). En el estudio efectuado por Fernández [76], muestran que la ecotoxicidad se relaciona más con las Ag⁺ que con las AgNPs, y que la exposición continua a Ag⁺ puede ocasionar alteración fisiológicas en los organismos. Si bien estos estudios abordaron las nanopartículas de plata, se puede extrapolar estos efectos a otros metales de los que se obtienen las nanopartículas, debido a que el mecanismo de acción es similar entre las diferentes nanopartículas.

Consideraciones finales

Con esta revisión se pudo determinar que las nanopartículas metálicas son una alternativa eficaz para el control de diferentes tipos de agentes patógenos, tales como, hongos, bacterias, en especial del hongo causante de la enfermedad de Panamá. Además, su implementación es una alternativa al uso de fungicidas tradicionales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el mal uso de estas puede tener implicaciones en el crecimiento de microorganismos beneficiosos para las plantaciones [84]. Como bien se informó esto puede ocurrir debido a la concentración aplicada, por lo cual se sugiere buscar una concentración mínima con el potencial inhibitorio más alto para cada patógeno.

Una alternativa para disminuir este impacto negativo en el medio ambiente es generar materiales compuestos, en donde las diferentes nanopartículas metálicas queden embebidas, y tener un control en la liberación de estas; también se puede aprovechar las propiedades antifúngicas de otros materiales como los polímeros naturales, entre los cuales se tiene el quitosano, la fibroína y sericina de seda. Dichos polímeros han demostrado tener la capacidad de inhibir diferentes tipos de microorganismos y agentes fitopatógenos, con ello se lograría tener una sinergia entre sus propiedades, potencializando así la capacidad antibacteriana y antimicótica de las nanopartículas de plata.

Conclusiones

Es necesario generar un plan de contingencia y control en las zonas productoras de bananos para prevenir la aparición del hongo *Fusarium* en los terrenos.

La capacidad antibacteriana y antimicótica de las nanopartículas metálicas está relacionada con el tamaño y forma de estas, a menor tamaño se obtienen mejor desempeño.

El uso de nanopartículas metálicas es una alternativa con gran potencial para controlar y evitar la propagación del hongo *Fusarium* R4T en las plantaciones de banano y plátano. Su uso en terrenos debe ser supervisado, puesto que el mal uso de estas puede llevar a problemas ambientales.

Una solución para depositar las nanopartículas metálicas en los terrenos es generar un material compuesto en el cual se embeban y haya un control en el tiempo de su liberación.

Referencias

- [1] Iriarte A, Almeida MG, Villalobos P. Carbon footprint of premium quality export bananas: Case study in Ecuador, the world's largest exporter. *Sci. Total Environ.* 2014;472:1082-1088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.072>
- [2] Villa-Martínez A, Pérez-Leal R, Morales-Morales HA, Basurto-Sotelo M, Soto-Parra JM, Martínez-Escudero E. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica.* 2015;64(2):194–205. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Banana Market review.* FAO; 2018.
- [4] Ploetz RC. Panama Disease: A Classic and Destructive Disease of Banana. *Agric. Sci.* 2000;1(1):1–7. <https://doi.org/10.1094/PHP-2000-1204-01-HM>
- [5] Rodríguez MA. *Mal De Panamá: Medidas De Control Y Prevención.* Agrocabildo. 2012:2–4.
- [6] Sabadell González S. *Etiología y epidemiología 'falso mal de Panamá' de la platanera en Canarias (Tesis doctoral).* Barcelona, España: Universitat Autònoma de Barcelona; 2003.
- [7] Deacon JW, Herbert JA, Dames J. False Panama disorder of bananas. *ITSC Inf. Bull.* 1985;149:15–18.
- [8] De Beer Z, Hernández JM, Sabadel S. enfermedad del falso mal de Panamá en banano. *Africa (Lond).* 2001;2(9):4–7.
- [9] AgroCabildo. *Mal de Panamá: medidas de prevención y control* [Online]. 2019. Available: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2019/07/26/mal-de-panama-medidas-de-prevencion-y-control/>. Accessed on 19-Aug-2023.
- [10] Latinoamerica. *Mal de Panamá asecha a América Latina Plantaciones de banano en alerta* [Online]. Available: <https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/mal-de-panama>. [Accessed: 22-Aug-2023].
- [11] López-Zapata SP, Castaño-Zapata J. Manejo integrado del mal de Panamá [*Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. sp. *cubense* (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 2019;22(2):e1240. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1240>
- [12] Vázquez Barajas DA. *Estudio de la diversidad molecular de Fusarium oxysporum f. sp. cubense presente en Colombia (Tesis de maestría).* Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2021.
- [13] Maryani N, Lombard L, Poerba YS, Subandiyah S, Crous PW, Kema GHJ. Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in the Indonesian centre of origin. *Stud. Mycol.* 2019;92(1):155-194. <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.06.003>

- [14] Fang H, Zhong C, Sun J, Chen H. Revealing the different resistance mechanisms of banana 'Guijiao 9' to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 using comparative proteomic analysis. J. Proteomics. 2023;283:104937. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2023.104937>
- [15] Fernandes LB, D'Souza JS, Prasad TSK, Ghag SB. Isolation and characterization of extracellular vesicles from *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, a banana wilt pathogen. Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj. 2023;1867:130382. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2023.130382>
- [16] Shen T, Wang Q, Li C, Zhou B, Li Y, Liu Y. Transcriptome sequencing analysis reveals silver nanoparticles antifungal molecular mechanism of the soil fungi *Fusarium solani* species complex. J. Hazard. Mater. 2020;388:122063. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122063>
- [17] Yang J, Ren X, Liu M, Fan P, Ruan Y, Zhao Y, et al. Suppressing soil-borne *Fusarium* pathogens of bananas by planting different cultivars of pineapples, with comparisons of the resulting bacterial and fungal communities. Appl. Soil Ecol. 2022;169:104211. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104211>
- [18] Yin Yin M, Si-Jun Z, Siamak SB, Kyaw SO. The antagonistic mechanism of rhizosphere microbes and endophytes on the interaction between banana and *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 2021;116:101733. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101733>
- [19] Tapia C, Amaro J. Género fusarium. Rev. Chil. Infectol. 2014;31(1):85–86. <http://doi.org/10.4067/S0716-10182014000100012>
- [20] Martínez-Solórzano GE, Rey-Brina JC, Pargas-Pichardo RE, Manzanilla EE. Marchitez por *Fusarium* raza tropical 4: Estado actual y presencia en el continente americano Agron. Mesoam. 2019;31(1):259-276. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.37925>
- [21] Congreso de la República de Colombia. Ley 2303 de 2023. Bogotá, Colombia: Suin Juriscol; 2023.
- [22] Bancolombia. Del campo al mundo: El sector agropecuario en Colombia [Online]. Available: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/negocios-pymes/actualizate/sostenibilidad/sector-agropecuario-en-colombia>.
- [23] MinAgricultura. En Julio, exportaciones agropecuarias crecieron 3,2% en valor y 9% en volumen [Online]. 2019. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/-En-Julio,-exportaciones-agropecuarias-crecieron-3,2-en-valor-y-9-en-volumen-.aspx>
- [24] Portafolio. Buen balance del país en exportaciones de banano [Online]. 2019. Available: <https://www.portafolio.co/economia/buen-balance-del-pais-en-exportaciones-de-banano-531443>. [Accessed: 28-Aug-2023].
- [25] Portafolio. Exportación de banano superaría los US\$1.000 millones en dos años. 2018.
- [26] Aguirre E. ¿Qué ha pasado en Colombia con el hongo fusarium raza 4? [Online] 2020. Available: <https://www.agronegocios.co/analisis/emerson-aguirre-3057285/que-ha-pasado-en-colombia-con-el-hongo-fusarium-raza-4-3057215>. [Accessed: 09-Oct-2021].
- [27] ICA. Es urgente aumentar la bioseguridad en cada finca para prevenir la dispersión del hongo *Fusarium R4T*. no. 12;2019.
- [28] Canal RCN. ¿Qué significa la emergencia nacional por hongo que afecta cultivos de banano? [Online] 2019. Available: <https://www.noticiascn.com/colombia/que-significa-la-emergencia-nacional-por-hongo-que-afecta-cultivos-de-banano-345571>.
- [29] EL HERALDO. Despidos masivos en bananeras guajiras tras emergencia por presencia del hongo R4T [Online]. 2019. Available: <https://www.elheraldo.co/la-guajira/despidos-masivos-en-bananeras-guajiras-tras-emergencia-por-presencia-del-hongo-r4t-656557>.
- [30] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical - Marchitez por *Fusarium*. 2023. Available: <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20Fusariosis%20de%20las%20mus%C3%A1ceas.pdf>
- [31] Molano Prieto O.J., Montoya Rios D.P. Análisis de producción, rendimiento y exportación de banano en los principales países afectados por el hongo *Fusarium oxysporum* F. sp. *Cubense* (Foc R4T) y recomendaciones para Colombia. 2022.

- [32] Jaramillo J, Rodríguez VP, Guzmán M, Zapata M, Rengifo T. Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. FAO; 2007.
- [33] Sandoval-Chávez RA, Martínez-Peniche RA, Hernández-Iturriaga M, Fernández-Escartín E, Sofía Arvizu-Medrano S, Soto-Muñoz L. Control biológico y químico contra *Fusarium stilboides* en pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) en poscosecha. Rev. Chapingo. Ser. Hortic. 2011;17(2):161-172.
- [34] Carmona M, Francisco S. The Problem of Resistance of Fungi To Fungicides. Causes and Effects on Extensive Crops. Agron. y Ambient. 2017;37(1):1-19.
- [35] Castellanos Gonzalez L, Torrado Martínez JM, Céspedes Novoa N. Alternativas biológicas para el control de *Fusarium oxysporum* en arveja en Pamplona, Norte de Santander. Rev. Investig. Agrar. y Ambient. 2020;12(1):13-28. <https://doi.org/10.22490/21456453.3650>
- [36] Dawoud TM, Yassin MA, El-Samawaty ARM, Elgorban AM. Silver nanoparticles synthesized by *Nigrospora oryzae* showed antifungal activity. Saudi J. Biol. Sci. 2021;28(3):1847-1852. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.036>
- [37] Kaur P, Duhan JS, Thakur R. Comparative pot studies of chitosan and chitosan-metal nanocomposites as nano-agrochemicals against fusarium wilt of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Biocatal. Agric. Biotechnol. 2018;14:466-471. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.04.014>
- [38] Baker S, Volova T, Prudnikova SV, Satish S, Prasad MN. Nanoagroparticles emerging trends and future prospect in modern agriculture system. Environmental Toxicology and Pharmacology. 2017;53:10-17. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.04.012>
- [39] Gopinath V, Velusamy P. Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using *Bacillus* sp. GP-23 and evaluation of their antifungal activity towards *Fusarium oxysporum*. Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 2013;106:170-174. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.12.087>
- [40] Ngoc-Diep Pham. Preparation and characterization of antifungal colloidal copper nanoparticles and their antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and *Phytophthora capsici*. Comptes Rendus Chim. 2019;22(11-12):786-793.
- [41] Zanella R. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. Mundo Nano. 2012;5(1):69-81. doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45167
- [42] Gómez F. Nanopartículas metálicas y sus aplicaciones. Rev. Digit. innovación y Cienc. 2016:1-11.
- [43] Gómez-Garzón M. Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. Revista Repert. Med. Cir. 2018;27(2):75-80. <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>
- [44] Esquivel-Figueroa R, Mas-Diego SM. Síntesis biológica de nanopartículas de plata: revisión del uso potencial de la especie *Trichoderma*. Rev. Cuba. Química. 2021;33(2):23-45.
- [45] Fernández Bueno T. Estudio de las aplicaciones biomédicas de las nanopartículas de plata (Tesis de grado). Sevilla, España: Universidad de Sevilla; 2017.
- [46] Rivas Ramírez LK, Torres Pacheco I. Nanopartículas: Nuevas Aliadas De La Agricultura. DC@UAQ. 2021;14(2):19-27.
- [47] Lira-Saldivar RH, Méndez Argüello B, Santos Villarreal GD, Vera Reyes I. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Univ. 2018;28(2):9-24. doi.org/10.15174/au.2018.1575
- [48] Shen T, Wang Q, Li C, Zhou B, Li Y, Liu Y. Transcriptome sequencing analysis reveals silver nanoparticles antifungal molecular mechanism of the soil fungi *Fusarium solani* species complex. J. Hazard. Mater. 2020;388:122063. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122063
- [49] Malandrakis AA, Kavroulakis N, Avramidou M, Papadopoulou KK, Tsaniklidis G, Chrysikopoulos CV. Metal nanoparticles: Phytotoxicity on tomato and effect on symbiosis with the *Fusarium solani* FsK strain. Sci. Total Environ. 2021;787:147606. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147606
- [50] Hermida-Montero LA, Pariona N, Mtz-Enriquez AI, Carrión G, Paraguay-Delgado F, Rosas-Saito G. Aqueous-phase synthesis of nanoparticles of copper/copper oxides and their antifungal effect against *Fusarium oxysporum*. J. Hazard. Mater. 2019;380:120850. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120850

- [51] Quintero-Quiroz C, Botero LE, Zárate-Triviño D, Acevedo-Yepes N, Saldarriaga Escobar J, Pérez VZ, *et al.* Synthesis and characterization of a silver nanoparticle-containing polymer composite with antimicrobial abilities for application in prosthetic and orthotic devices. *Biomater. Res.* 2020;24(1):13. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00191-6>
- [52] Dakal TC, Kumar A, Majumdar RS, Yadav V. Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Front. Microbiol.* 2016;7:1831. doi.org/10.3389/fmicb.2016.01831
- [53] Barrantes Murillo C, Ortega Oviedo G. Nanopartículas y antibióticos: respuesta a la resistencia global bacteriana. *Rev. Cienc. y Salud Integr. Conoc.* 2020;4(5):34-43.
- [54] Reyes Rodríguez PY. Síntesis y caracterización de nanopartículas de cobre y óxido de cobre y su incorporación en una matriz polimérica y el estudio de sus propiedades antibacterianas (Tesis de maestría). Saltillo, México: Centro de Investigación en Química Aplicada; 2012.
- [55] Alvarracin M, Cuenca K, Pacheco E. Nanopartículas antimicrobianas en odontología: Estado del arte. 2021:1–9.
- [56] Vázquez Muñoz R. Evaluación de las interacciones entre las nanopartículas de plata y microorganismos patógenos (Tesis de doctorado). Baja California, México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; 2017.
- [57] Pal S, Tak KY, Song JM. Does the Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Depend on the Shape of the Nanoparticle? A Study of the Gram-Negative Bacterium *Escherichia coli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 2007;73 (6):1712–1720. [doi:10.1128/AEM.02218-06](https://doi.org/10.1128/AEM.02218-06)
- [58] Raza MA, Kanwal Z, Rauf A, Sabri AN, Riaz S, Naseem S. Size- and shape-dependent antibacterial studies of silver nanoparticles synthesized by wet chemical routes. *Nanomaterials.* 2016;6(4):74. <https://www.mdpi.com/2079-4991/6/4/74>
- [59] Wani IA, Ahmad T. Size and shape dependant antifungal activity of gold nanoparticles: A case study of *Candida*. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces.* 2013;101:162-170. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.06.005>
- [60] Pariona N, Paraguay-Delgado F, Basurto-Cereceda S, Morales-Mendoza JE, Hermida-Montero LA, Mtz-Enriquez AI. Shape-dependent antifungal activity of ZnO particles against phytopathogenic fungi. *Appl. Nanosci.* 2020;10:435-443. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01127-w>
- [61] Ivask A, ElBadaway A, Kaweeteerawat C, Boren D, Fischer H, Ji Z, *et al.* Toxicity mechanisms in *Escherichia coli* vary for silver nanoparticles and differ from ionic silver. *ACS Nano.* 2014;8(1):374-386. <https://doi.org/10.1021/nn4044047>
- [62] Susan A, Mansor A, Mahnaz M, Sanaz A. Preparation, Characterization, and Antimicrobial Activities of ZnO Nanoparticles/Cellulose Nanocrystal Nanocomposites. *Bioresour.* 2013;8(2):1841–1851.
- [63] Shaban AS, Owda ME, Basuoni MM, Mousa MA, Radwan AA, Saleh AK. *Punica granatum* peel extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles: structure and evaluation of their biological applications. *Biomass Conv. Bioref.* 2022:1-17. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03185-7>
- [64] Khandel P, Yadaw RK, Soni DK, Kanwar L, Shahi SK. Biogenesis of metal nanoparticles and their pharmacological applications: present status and application prospects. *J Nanostruct Chem.* 2018;8:217-254. <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0267-4>
- [65] Pham ND, Duong MM, Le MV, Hoang HA, Pham LKO. Preparation and characterization of antifungal colloidal copper nanoparticles and their antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and *Phytophthora capsic*. *Comptes Rendus Chim.* 2019;22(11-12):786-793. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2019.10.007>
- [66] López-Luna J, Nopal-Hormiga Y, López-Sánchez L, Mtz-Enriquez AI, Pariona N. Effect of methods application of copper nanoparticles in the growth of avocado plants. *Sci. Total Environ.* 2023;880:163341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163341>
- [67] Khalil NM, Abd El-Ghany MN, Rodríguez-Couto S. Antifungal and anti-mycotoxin efficacy of biogenic silver nanoparticles produced by *Fusarium chlamydosporum* and *Penicillium chrysogenum* at non-cytotoxic doses. *Chemosphere.* 2019;218:477-486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.129>
- [68] Rasmiya Begum SL, Jayawardana NU. Green synthesized metal nanoparticles as an ecofriendly measure for plant growth stimulation and disease resistance. *Plant Nano Biol.* 2023;3:100028. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100028>

- [69]Thakur A, Sharma N, Bhatti M, Sharma M, Trukhanov AV, Trukhanov SV, *et al.* Synthesis of barium ferrite nanoparticles using rhizome extract of *Acorus Calamus*: Characterization and its efficacy against different plant phytopathogenic fungi. 2020;24:100599. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100599>
- [70]Fujikawa I, Takehara Y, Ota M, Imada K, Sasaki K, Kajihara H, *et al.* Magnesium oxide induces immunity against Fusarium wilt by triggering the jasmonic acid signaling pathway in tomato. 2021;325:100-108. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.11.012>
- [71]Khuda F, Haq ZU, Ilahi I, Ullah R, Khan A, Fouad H, *et al.* Synthesis of gold nanoparticles using Sambucus wightiana extract and investigation of its antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant and analgesic activities. Arab. J. Chem. 2021;14(10)103343. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103343>
- [72]Krishnamoorthi R, Bharathakumar S, Malaikozhundan B, Mahalingam PU. Mycofabrication of gold nanoparticles: Optimization, characterization, stabilization and evaluation of its antimicrobial potential on selected human pathogens. Biocatal. Agric. Biotechnol. 2021;35:102107. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102107>
- [73]Villamor Sancho EJ, Impacto medioambiental del uso de nanopartículas (Tesis de grado). Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- [74]Wang P, Lombi E, Menzies NW, Zhao FJ, Kopittke PM. Engineered silver nanoparticles in terrestrial environments: a meta-analysis shows that the overall environmental risk is small. Environ. Sci. Nano. 2018;11:2531-2544.
- [75]Banu AN, Kudesia N, Raut AM, Pakrudheen I, Wahengbam J. Toxicity, bioaccumulation, and transformation of silver nanoparticles in aqua biota: a review. Environmental Chemistry Letters. 2021;19:4275–4296. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01304-w>
- [76]Fernandez Lopez G. Bioensayos de acumulación de nanopartículas de plata (Ag NPs) en larvas de dorada (*Sparus aurata*) (Tesis de grado). Puerto Real, España: Universidad de Cádiz; 2018.
- [77]Tortella GR, Rubilar O, Durán N, Diez MC, Martínez M, *et al.* Silver nanoparticles: Toxicity in model organisms as an overview of its hazard for human health and the environment. 2020;390:121974. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121974>
- [78]Haddaji C, Ennaciri K, Driouich A, Digua K, Souabi S. Optimization of the coagulation-flocculation process for vegetable oil refinery wastewater using a full factorial design. Process Saf. Environ. Prot. 2022;160:803–816. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.068>
- [79]McLaughlin M, Pennock D, Rodriguez-Eugenio N. La contaminación del suelo: una realidad oculta. 2019.
- [80]Rehman K, Fatima F, Waheed I, Akash MSH. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. J. Cell. Biochem. 2018;119(1)157–184. <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>
- [81]Daniela M, Calvopiña A, Joel M, Maya M, Andrea G, Parra R. Contaminantes emergentes en aguas y remediación de suelos con nanopartículas. Revista Alianzas y Tendencias BUAP (AyTBUAP). 2021;6(24):50–74. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5594782>
- [82]Hashimoto Y, Takeuchi S, Mitsunobu S, Ok YS. Chemical speciation of silver (Ag) in soils under aerobic and anaerobic conditions: Ag nanoparticles vs. ionic Ag. J. Hazard. Mater. 2017;322(A):318-324. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.001>
- [83]Tran TK, Nguyen MK, Lin C, Hoang TD, Nguyen TC, Lone AM, *et al.* Review on fate, transport, toxicity and health risk of nanoparticles in natural ecosystems: Emerging challenges in the modern age and solutions toward a sustainable environment. Sci. Total Environ. 2024;912:169331. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169331>
- [84]Ameen F, Alsamhary K, Alabdullatif JA, ALNadhari S. A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021;213:112027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112027>