



NANOPARTÍCULAS: NUEVAS ALIADAS DE LA AGRICULTURA.

NANOPARTICLES: NEW ALLIES OF AGRICULTURE.

Rivas-Ramírez Luisa Katiana¹, Torres-Pacheco Irineo¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carreterra Chichimequillas s/n Km 1, 76265. El Marqués, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia, correo: luisakriv@gmail.com

Resumen

La protección de los cultivos agrícolas es esencial para la producción de alimentos seguros, en la actualidad y en el futuro. No obstante, la eficacia de los plaguicidas se ve amenazada por la evolución de patógenos resistentes; por esto es importante la generación de distintas estrategias para el manejo de plagas. La nanotecnología ha desarrollado materiales con interesantes propiedades antimicrobianas, propias de los niveles nanométricos; estos materiales son principalmente nanopartículas metálicas y óxidos metálicos, que sugieren el control de plagas a través de diversos mecanismos de acción, diferentes de los plaguicidas convencionales. En este trabajo de divulgación se presenta la evidencia de estudios científicos usando diferentes nanopartículas para el manejo de bacterias, hongos y virus de interés agrícola.

Palabras clave: *Nanopartículas, NP-ZnO, Plaguicidas.*

Abstract

Agricultural crops protection is essential for the production of safe food, now and in the future. However, the efficacy of pesticides is threatened by the evolution of resistant pathogens; for this reason, the generation of different strategies for pest management is important. Nanotechnology has developed materials with interesting antimicrobial properties, typical of nanometric levels; these materials are mainly metallic nanoparticles, which suggest the control of pests through various mechanisms of action, different from conventional pesticides. The evidence of scientific studies using different nanoparticles for the management of bacteria, fungi and viruses of agricultural interest is presented in this work.

Keywords: Nanoparticles, NP-ZnO, Pesticides

1. Introducción

Para alimentar de manera sostenible a diez mil millones de personas en el 2050 (GEO, 2020) se estima que la producción agrícola debería aumentar un 60%; para ello será necesario proteger los cultivos contra las plagas de insectos, enfermedades y malezas. Para lograr esto, la agricultura comercial utiliza comúnmente plaguicidas en los alimentos que consumimos; gracias a esos plaguicidas los productores incrementan el rendimiento de sus cosechas en conjunto con un apropiado manejo de nutrición y riego. Por otro lado, todos los alimentos destinados al consumo humano están sujetos a un límite máximo de residuos (LMR) de plaguicidas en su composición; es decir, las cantidades máximas de residuos de plaguicidas que pueden encontrarse en los alimentos para que éstos sean seguros (Navas y García-Fernández, 2020).

Los plaguicidas, también llamados productos fitosanitarios cuando se aplican en la agricultura, se usan para prevenir, disminuir o eliminar por completo a las plagas. Las plagas, también referidas como patógenos, son aquellas plantas, animales, insectos, microbios u otros organismos no deseados que en cierto número de población se convierten en un problema para las plantas; adicionalmente, este problema se convierte en un importante inconveniente para los productores. Los plaguicidas se clasifican en función del patógeno al cual afectan; de tal forma que un insecticida afecta a insectos, mientras que un herbicida daña a plantas consideradas malezas (cualquier planta que no sea el producto deseado). De igual manera, los fungicidas combaten hongos, y los viricidas inactivan a la actividad de los virus.

A pesar de estas ventajas, los plaguicidas perjudican también al ambiente y dañan la salud tanto humana como animal; el uso de plaguicidas en la agricultura es una de las principales fuentes de contaminación para las aguas subterráneas, lo que finalmente se propaga al agua potable que consume la sociedad (Li, 2018). Por otro lado, la naturaleza tóxica de los plaguicidas permite eliminar los patógenos nocivos; sin embargo, los plaguicidas no son tan selectivos y también afectan las bacterias simbióticas y hongos benéficos (MacWilliam y col. 2015). Adicionalmente, la mayoría de los plaguicidas afectan la división celular en las células de las raíces de las plantas, afectando de este modo la absorción de nutrientes (Sánchez y col. 2018). Cabe mencionar que no sólo la microbiota, o microorganismos

presentes del suelo, es afectada, sino también otros organismos como los insectos polinizadores; por ejemplo, los insecticidas pueden matar directamente a las abejas, mientras que los herbicidas reducen la diversidad de sus recursos alimenticios, lo que afecta indirectamente su supervivencia y reproducción (Sánchez-bayo, 2016). Por si esto no fuera suficiente, los plaguicidas se acumulan y concentran a lo largo de la cadena alimenticia; por lo que finalmente llegan al cuerpo humano, específicamente a los tejidos grasos y causan efectos por su acumulación (MacWilliam y col. 2015). Por esta razón es necesario adoptar medidas urgentes para detener y revertir esa situación, además de mantener la integridad actual y futura de los ecosistemas mundiales.

Desde la perspectiva económica, la fabricación de productos fitosanitarios no es atractiva, ya que su eficacia es amenazada por la resistencia de los organismos a los plaguicidas (Hawkins y col. 2019). Además, existen costos de licencias sanitarias para el uso de dichos plaguicidas; por ejemplo, en México los costos de licencias sanitarias por parte de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) ascienden a \$24,393.29 por producto (COFEPRIS, 2020).

Por lo anteriormente expuesto es imperativo usar diferentes alternativas para el control de plagas y enfermedades, que permitan resguardar la seguridad alimentaria con mínimo impacto ambiental. Una alternativa de la cual la agroindustria recientemente hace uso es la nanotecnología, la cual permite manipular los materiales a nivel nanoescala; en la agricultura, la nanotecnología permite generar fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, fungicidas y sensores (Paramo y col. 2020) mediante la fabricación y manipulación de nanopartículas (NPs). Las NPs son un objeto pequeño de dimensiones menores a 100 nanómetros (nm) en al menos una de sus tres dimensiones (largo, ancho, alto); un nanómetro equivale a una mil millonésima parte de un metro, lo cual resulta invisible a simple vista ¡Eso es 10 a 100 veces más pequeño que una bacteria, y cerca de 1000 veces más pequeño que la célula humana típica! estos tamaños son los responsables de las propiedades antimicrobianas de las NPs. Diversos estudios han observado que a menor tamaño de partícula y mayor concentración de la misma mayor potencial antimicrobiano presentan, lo más aceptado es que la simple interacción NP-patógeno es suficiente para manifestar su inhibición. Considere el lector un material cualquiera que se corta en

muchas piezas pequeñas, las cuales en conjunto tienen mayor área de contacto que si sólo se tuviera el material en su tamaño original; estas piezas pequeñas presentan propiedades físicas, químicas, electrónicas entre otras, diferentes al material original (Singh y col. 2017). Es por esta razón que en el presente artículo se presenta información sobre nanotecnología y, en particular, sobre el uso de nanopartículas para el manejo de hongos, bacterias y virus agrícolas.

2. Las nanopartículas y la agricultura

El tipo de nanomateriales más estudiado es la nanopartícula, esto es en gran medida debido a su facilidad y eficiencia de producción a partir de una variedad de materiales. El tamaño, la composición y el tipo de moléculas en la superficie de la partícula constituyen una identidad sintética para la nanopartícula, similar a una huella digital. La identidad sintética se determina mediante el método de síntesis utilizado, y de ello también dependen las increíbles características que poseen. Para producir nanopartículas pueden usarse métodos biológicos, físicos y químicos; dentro de los métodos químicos hay métodos descendentes y ascendentes. El método descendente (en inglés top-down approach) implica una gran estructura que se divide en unidades de tamaño nanométrico, mientras que los métodos ascendentes (en inglés bottom-up approach) implica reacciones químicas que conducen a la agregación de átomos en partículas (Król y col. 2017).

La síntesis química de nanopartículas metálicas involucra tres ingredientes: una sal metálica, un agente reductor y un agente estabilizante. La síntesis consiste en reducir la sal metálica usando un agente reductor, es decir el metal cargado positivamente gana electrones para reducir su carga a una neutra, de este modo se generan átomos individuales de metal puro. Estos átomos se convierten en sitios de nucleación, lo que es igual a que cada átomo actúa como un punto de partida para el crecimiento. El segundo paso de la síntesis consiste en agregar un agente estabilizante que sirve para detener el crecimiento de las NPs, de lo contrario, las nanopartículas crecerán en función de la disponibilidad de los átomos de metal en la solución. El crecimiento descontrolado daría lugar a partículas fuera de la escala nanométrica.

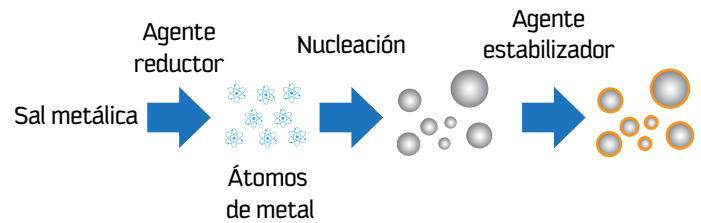


Figura 1. Formación de NPs a partir de sales metálicas.

El control de la nucleación y el crecimiento de NPs son muy importantes debido a que controlan el tamaño y las formas de las mismas. Las diferentes condiciones sintéticas producen diferentes morfologías de crecimiento, de las cuales se han sintetizado satisfactoriamente nanoesferas, nanocables, nanotubos e incluso nanoflores o nanoestrellas como las observadas en la figura 2.

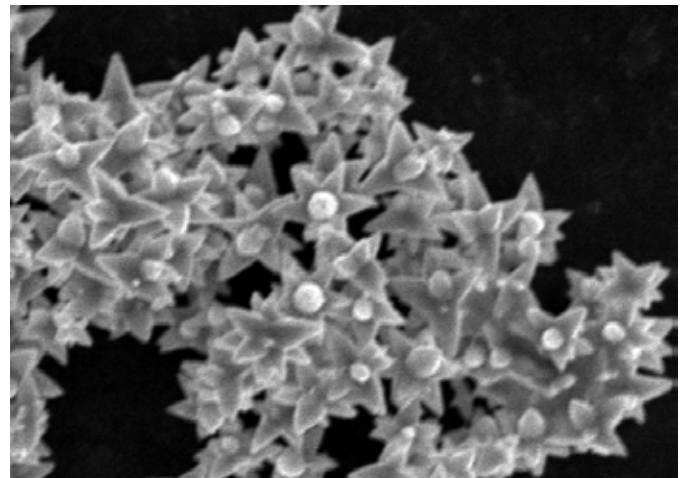


Figura 2. Nanoestrellas de ZnO obtenidas por síntesis química.

Otra manera para sintetizar nanopartículas es mediante métodos biológicos que usan extractos acuosos de plantas, bacterias, hongos e incluso virus. En particular, los extractos acuosos de plantas son soluciones que contienen uno o más ingredientes activos de una planta específica. Las plantas pueden proveer un gran número de agentes reductores naturales que podrían producir nanopartículas empleando sales metálicas u óxidos metálicos; entre estas moléculas naturales están los terpenoides, polifenoles, azúcares, alcaloides, y proteínas (Makarov y col. 2014). Las plantas que contienen metales son tratadas con temperaturas inferiores a la de fundición lo cual forma una

masa sólida bien compacta sin derretir el metal (Kharissova y col. 2013). El uso de extractos de plantas para sintetizar nanopartículas es probablemente el método más rápido y está libre de desechos químicos (Raghunath y Perumal. 2017). Todavía hay un largo camino por recorrer para sustituir los métodos tradicionales de síntesis química por los métodos biológicos, sin embargo, la calidad de las NPs es comparable con las de metodología tradicional. Sin importar el método utilizado, lo importante es controlar las condiciones que nos proporcionen el tamaño y la forma buscada.

Por otro lado, las características más relevantes que afectan la actividad antimicrobiana descritas en la investigación bibliográfica realizada por Sirelkhatim y colaboradores en el 2015, son las siguientes:

- a) *El tamaño de la NP*, en el cual las NPs se benefician de tener una dimensión similar o menor que el patógeno objetivo debido a que permite una interacción íntima.
- b) *La concentración de las NPs*, está ampliamente reportada la correlación lineal entre la dosis y la actividad antimicrobiana.
- c) *El porcentaje de facetas activas en las NPs determinado por su morfología*, donde se ha observado que las facetas con una alta densidad de átomos de {111} exhiben una mayor actividad antimicrobiana.
- d) *La carga superficial de las NPs*, la cual debe ser suficientemente positiva para atraer electrostáticamente las membranas celulares de bacterias y virus, además de que evitan la aglomeración de sí mismas al mismo tiempo.
- e) *Los efectos fotocatalíticos de las NPs*, especialmente en óxidos metálicos que tienen la capacidad de reaccionar bajo el estímulo con luz, esto mejora la actividad antimicrobiana.
- f) *Defectos superficiales*, las NPs que contienen numerosos bordes y esquinas presentan posibles sitios de superficie reactiva con independencia de su sencilla fórmula química.

Ahora bien, lo que hace particularmente interesante el uso de NPs es que no desarrollan resistencia por patógenos, esencialmente porque los mecanismos de acción de los plaguicidas son distintos; por ejemplo, algunos insecticidas inhiben la enzima colinesterasa, por ello se acumula acetilcolina, esto provoca contracciones de los músculos y finalmente parálisis en insectos (Kumar, 2013). Por otro lado, algunos fungicidas inhiben la biosíntesis de quitina, componente estructural de la pared celular en hongos; o bien, inhiben sustancias importantes como la melanina

fúngica, pigmento involucrado en la defensa antifúngica, es decir, evaden la respuesta inmune de las plantas que afectan (Casadevall, 2018). Los microorganismos patógenos han encontrado el modo de generar resistencia a estos mecanismos, lo cual es posible mediante mutaciones genéticas debido al mal uso de los productos fitosanitarios, por ejemplo, no respetar las indicaciones de la etiqueta como es el tiempo y frecuencia del tratamiento; también no alternar el principio activo en caso de presentar reincidencia de la plaga. En consecuencia, se generan plagas más resistentes y difíciles de tratar que los individuos iniciales.

En la investigación realizada por Raghunath y Perumal en el 2017, se detallan algunos de los mecanismos de nanopartículas propuestos en recientes investigaciones. A continuación, éstos se describen brevemente.

2.1. Daño de la cubierta celular

La cubierta o capa que protege a una célula del medio exterior se llama membrana celular. Cuando se trata de una célula proveniente de una bacteria, su membrana celular es referida como membrana bacteriana; del mismo modo ocurre para las membranas de células vegetales, hongos y sólo en el caso particular de los virus, capsida. Las membranas no sólo separan el contenido celular de su exterior, también realizan importantes funciones como seleccionar lo que deja pasar a su interior; por ejemplo, los iones minerales como el Zn^{2+} , Ca^{2+} , K^{+} entran sin dificultad. Por ello se dice que las membranas son selectivas y esto se conoce como permeabilidad de la membrana. Por otro lado, las membranas bacterianas están compuestas de proteínas; las proteínas son macromoléculas formadas por cadenas lineales de aminoácidos. Los aminoácidos están compuestos por grupos químicos de tipo amino ($-NH$) y un ácido carboxílico ($-COOH$); estos grupos químicos son sitios de atracción de cationes metálicos, por ejemplo, de una NP metálica. Es importante mencionar que los cationes son aquellos iones con carga eléctrica positiva o que han perdido electrones. Como consecuencia de las leyes de carga eléctrica, que enuncian que las cargas opuestas son atraídas, la carga positiva de la NP y la carga negativa del grupo carboxilo presente en la membrana bacteriana se atraen electrostáticamente; es por ello que se unen y las NP se acumulan en la superficie celular, siendo esta unión por sí sola tóxica en las bacterias.

2.2. Alteración del equilibrio de iones metálicos

El equilibrio u homeostasis de iones metálicos en un microorganismo regula la actividad de coenzimas, cofactores y catalizadores (aceleradores de reacciones químicas) esenciales para importantes funciones metabólicas. Cuando las bacterias tienen un exceso de metales o iones metálicos se trastornan las funciones fisiológicas; por ejemplo, los iones metálicos se unen al ADN y alteran su naturaleza helicoidal, esto interrumpe procesos celulares como la replicación de la información genética a nuevas células. Adicionalmente, los iones metálicos neutralizan la carga de un tipo de moléculas presentes en la membrana bacteriana, llamadas lipopolisacáridos (LPS); en consecuencia, la membrana pierde selectividad y permite la entrada de tales iones metálicos, finalmente el crecimiento bacteriano se ralentiza conforme las membranas se desorganizan.

2.3. Producción de especies reactivas de oxígeno.

Las NPs al acumularse en la membrana celular inducen la generación de ROS. Los ROS incluyen radicales libres que son el superóxido (O_2^-) y el hidroxilo (OH^-), como también los de tipo no radicales como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el oxígeno singlete (1O_2). Los ROS causan daños celulares, los cuales se manifiestan en forma de degradación de biomoléculas como proteínas, lípidos y ácidos nucleicos; es por esto que ocurre la muerte celular (Das y Roychoudhury, 2014). La producción de ROS se considera el mecanismo antimicrobiano principal mediante el cual las NPs operan dentro de los microorganismos; esto es porque sin importar el tipo de NP, los niveles de ROS aumentan. Lo especial de este mecanismo es que los

microorganismos no desarrollan resistencia a partículas tan reactivas como son las ROS; por esta razón las NPs pueden usarse como alternativa para el manejo de plagas.

2.3.1. Degradación de enzimas y proteínas

Las NPs liberan iones metálicos que modifican de forma directa o indirecta a las proteínas; un ejemplo de modificación directa es la carbonilación, que consiste en la oxidación o pérdida de electrones de aminoácidos dando como resultando grupos carbonilos ($-CO$) unidos a proteínas. La carbonilación ocasiona la pérdida de actividad enzimática, desencadenando posteriormente la degradación de proteínas. Adicionalmente, los aminoácidos que presenten en su composición grupos tiol ($-SH$) como la cisteína, y grupos sulfuro, como la metionina, son más vulnerables a sufrir daños mediados por ROS (Das y Roychoudhury, 2014).

2.3.2. Daño del material genético

El ADN es un tipo de ácido nucleico que contiene toda la información genética de un organismo. Los ácidos nucleicos están formados por la repetición de nucleótidos, a su vez un nucleótido es la unión de una base nitrogenada, una azúcar y un grupo fosfato. Las NPs interactúan con ácidos nucleicos, y en consecuencia se suprime la división celular por interrumpir los procesos de replicación celular. Otra forma de dañar el material genético es a través de la generación de ROS. Las ROS dañan al ADN en diferentes formas que incluyen: la modificación de la base nitrogenada del nucleótido, abstracción de un nucleótido, roturas en cualquiera de las cadenas de ADN y formación de complejos ADN-proteínas; todas estas alteraciones interrumpen los procesos de replicación celular.

Tabla 1. Mecanismos antimicrobianos de nanopartículas: modos de actuación que manifiestan su inhibición.

Daño de la cubierta celular	Alteración del equilibrio de iones metálicos	Producción de especies reactivas de oxígeno
La interacción NP-patógeno es suficiente para causar toxicidad. Ej. En bacterias Gram positivas, Las NP-Au forman enlaces con los grupos fosfatos presentes en la azúcar de los Liposacaridos de la membrana bacteriana (Jacobson y col. 2015).	Bajo ciertas condiciones ambientales algunas NP se descomponen en sus iones metálicos; éstos causan la toxicidad en patógenos. Ej. La liberación de iones Zn^{2+} de NP-ZnO es directamente proporcional a la a inhibición antibacteriana (Siddiqi y col. 2018).	Las NPs producen ROS; especies altamente reactivas que degradan moléculas de importancia biológica como son las proteínas, ácidos nucleicos, azúcares y otros. Ej. La producción in situ de ROS bajo la interacción NP-virus desorganiza la cubierta proteica viral lo cual inhibe la infección viral (Vecitis, 2020).

3. Estudios de caso usando NPs

El uso de NPs como agente antimicrobiano reduce la posibilidad de que se desarrolle resistencia por sus múltiples mecanismos de acción. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la aplicación de NPs contra patógenos de interés agrícola.

3.1. Hongos

Los hongos son el grupo más abundante de patógenos vegetales. Estos organismos multicelulares son típicamente microscópicos; el cuerpo de un hongo está compuesto de hilos parecidos a filamentos llamados hifas, el conjunto de hifas se denominan micelios. Cuando los micelios son suficientemente grandes pueden verse sin la ayuda de un microscopio.

Rhizoctonia solani es un hongo patógeno de plantas, con un gran rango de huéspedes y de distribución mundial; este patógeno causa la pudrición de raíces de muchas especies hortícolas. Derbalah y colaboradores (2019) sintetizaron nanopartículas de óxido de zirconio (NP-ZrO) para tratar la pudrición de la raíz causada por *Rhizoctonia solani*, en plantas de pepino. Las plantas de pepino tratadas con NP-ZrO mostraron una reducción de los síntomas causados bajo condiciones de invernadero del 34-46%; mientras que en condiciones de cielo abierto (no protegido) del 52-56%, en comparación con las plantas no tratadas.

3.2. Bacterias

Las bacterias son microorganismos unicelulares las cuales habitan y proliferan en diferentes tipos de ambientes. *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis* (Cmm) es una bacteria patógena que produce la enfermedad del cancro bacteriano del tomate (BCT); esta es una enfermedad importante para la producción de tomate en todo el mundo. Actualmente no existe una variedad de tomate resistente al Cmm; sólo se dispone de controles químicos y culturales. Noshad y colaboradores (2020), usaron síntesis biológica utilizando extracto acuoso micelial del hongo benéfico *Pythium oligandrum*, para generar NP de plata (AgNP); ellos obtuvieron NP de tamaño de 12nm, las cuales a una concentración de 0.44 mg/L suprimieron la aparición del BCT bajo condiciones de invernadero.

3.3. Virus

Los virus son organismos más pequeños que las bacterias y necesitan de un cuerpo u organismo vivo para sobrevivir y multiplicarse, es decir, de un ser humano, una planta o de animales para multiplicarse. Cuando un virus ingresa a un ser vivo invade algunas de las células, y poco a poco se adueña de la maquinaria celular, convirtiéndola en una herramienta para producir más virus.

El virus mosaico del tabaco (TMV) se considera uno de los virus de plantas de mayor importancia científica y económica; esto debido a que infecta nueve familias de plantas y más de 125 especies. Hoy en día, las enfermedades virales en plantas no tienen tratamientos eficaces que controlen la enfermedad, sin embargo, en un reciente estudio llevado a cabo por Cai y colaboradores (2019), se cimienta la idea que las nanopartículas pueden ser empleadas como una novedosa estrategia antiviral en plantas; ellos sintetizaron químicamente NP de ZnO y SiO₂ con forma esférica y un tamaño de partícula de 18 nm y 20 nm respectivamente; sus resultados mostraron inhibición de la replicación viral del TMV, en plantas de tabaco, en tan sólo 12 días después de la inoculación con aplicaciones foliares diarias. El mecanismo sugerido para el tratamiento con NP-ZnO, es mediante la generación de ROS, en particular del H₂O₂; esto es debido a que la actividad enzimática de peroxidasa (POD) y catalasa (CAT), responsables de la desintoxicación de H₂O₂, incrementaron marcadamente un 208% y 66% respectivamente, comparadas con el control (las plantas no tratadas con NPs).

4. Impacto ambiental

Como pasa con cualquier producto químico, el riesgo que representan las NPs para la salud humana y ambiental está relacionado tanto con su posible toxicidad, biodisponibilidad y bioacumulación. La bioacumulación ocurre cuando una sustancia química se acumula en un organismo vivo, la cual debe permanecer en el organismo y no ser degradada fácilmente por las vías metabólicas de ese organismo, además, cuanto más fácil sea para las sustancias químicas moverse en el suelo o en el agua subterránea (biodisponible), más probable es que se extienda la contaminación por las mismas. Por otro

lado, las NPs pueden cambiar el tamaño, la forma o la composición una vez que se introducen en el medio ambiente, es decir “la identidad biológica” de una nanopartícula (dentro de cualquier compartimento ambiental) puede ser completamente diferente de su identidad sintética. Por ejemplo, las NPs con carga positiva se sienten atraídas por la carga negativa de la materia orgánica natural (MON) presente en el medio ambiente, esto ocasiona que las NPs se agrupen lo cual dificulta la movilidad de las mismas, además, si la materia orgánica es suficiente para mantener una carga negativa en la interacción NP-MON, esto disminuye la interacción con las membranas bacterianas, es decir disminuye su toxicidad (Mensch y col. 2017). Por otro lado, si la NPs son atrapadas por

microorganismos o plantas terrestres, estas pueden ser ingeridas y rápidamente biomagnificarse en la cadena alimenticia (Lohse y col. 2017). Lo que esto implica para la investigación es dirigir los esfuerzos a entender como afectan las diferentes condiciones ambientales la identidad sintética de las NPs y, si estos cambios representan una amenaza para la microbiota y organismos simples, en lugar de evaluar si las nanopartículas originales sintetizadas son peligrosas per se. Además, perfiles de hormesis, es decir la evaluación de la respuesta en función de la dosis, de diferentes NPs en diferentes cultivos son necesarios para evitar no sólo los efectos fisiológicos adversos en las plantas, sino también la bioacumulación ambiental con consecuencias inmesurables.

Tabla 2. Manejo de patógenos agrícolas usando nanopartículas.

Patógeno	NP	Síntesis	Tamaño	Conclusión	Referencia
<i>Aspergillus Flavus</i> , <i>Fusarium.oxysporum</i> , <i>P. funiculosum</i>	ZnO, esféricas	Biológica, extracto de <i>Lantana aculeata</i> Linn.	12 nm	Inhibición en <i>A. flavus</i> (21±1 mm) <i>F. oxysporum</i> (19±1 mm).	Narendhranand Sivaraj (2016)
<i>Virus mosaico del tabaco (TMV)</i>	ZnO, esféricas	Química, sol-gel	18 nm	Inhibición 100% con 12 aplicaciones foliares diarias.	Cai y col. (2019)
<i>Botrytis cinerea</i> , <i>A. Alternata</i> , <i>M. fructicola</i> , <i>C. gloeosporioides</i> , <i>F. solani</i> , <i>V. dahliae</i>	NP-Cu NP-ZnO NP-Ag	Química, Sigma	25 nm	Inhibición de la germinación de esporas y crecimiento micelial.	Malandrakis y col. (2019)
<i>Virus mosaico del tomate (ToMV)</i> , <i>virus de la papa (PVY)</i>	NP-Ag	Química, Sigma	<100nm	Inhibición de la concentración viral y síntomas usando 50 ppm.	El-DougDoug y col. (2018)
<i>Escherichia coli</i>	TiO ₂	Química, ultrasonido	20 nm	La sonicación (dispersión) del material incrementa la actividad antimicrobiana.	Estrada-Monje y col. (2019)
<i>Pseudomonas sp</i> , <i>Serratia sp</i> , <i>Xanthomonas sp</i> , <i>Erwinia sp</i> y <i>Acinetobacter sp</i>	NP-Ag	Biológica, extracto de <i>Penicillium purpurogenum</i>	10.5 nm	Inhibición de 93% a 99%	Rojas y col. (2020)
<i>Bemisia tabaci gennadius</i>	NP-Fe	Biológica, extracto <i>Isaria fumosorosea</i>	3 µm	Alta patogenicidad contra pupas y ninfas del segundo y tercer estadio.	Wang y col. (2019)

Conclusión

Durante el ciclo de vida de las plantas, éstas pueden enfrentar tensiones abióticas como es el daño por plagas, lo cual reduce y limita su productividad, por tanto, esto amenaza la producción de alimentos seguros. El desarrollo de nanopartículas metálicas presenta mecanismos de acción contra plagas a través de la generación de ROS; las plagas no desarrollan resistencia a estas especies debido a su corto periodo de vida media (de 2 μ s a 4 μ s) y su gran capacidad de generar daños en ese intervalo de tiempo a moléculas de gran importancia metabólica. El uso de NPs sugiere una alternativa de control de estos patógenos agrícolas, no obstante, se necesitan estudios que detallen la interacción de estas partículas en diversos compartimentos ambientales, así como los posibles efectos adversos en determinados umbrales.

Referencias bibliográficas

- Cai, L., Liu, C., Fan, G., Liu, C., & Sun, X. (2019). Preventing viral disease by ZnONPs through directly deactivating TMV and activating plant immunity in *Nicotiana benthamiana*. *Environmental Science: Nano*. doi:10.1039/c9en00850k.
- Casadevall, A. (2018). *Melanin triggers antifungal defences*. *Nature*, 555(7696), 319–320. doi:10.1038/d41586-018-02370-x
- Derbalah, A., Elsharkawy, M. M., Hamza, A., & El-Shaer, A. (2019). Resistance induction in cucumber and direct antifungal activity of zirconium oxide nanoparticles against *Rhizoctonia solani*. *Pesticide biochemistry and physiology*. doi:10.1016/j.pestbp.2019.03.018
- El-Dougdoug, Noha K., Bondok A.M. and El-Dougdoug K. A. (2018). Evaluation of silver nanoparticles as antiviral agent against ToMV and PVY in Tomato Plants. *Middle east journal of applied sciences*. 8(1): 100–111. ISSN 2077-4613
- Estrada-Monje, Anayansi. Zitzumbo-Guzmán, Roberto. Bañuelos-Díaz Jennifer A. Zaragoza-Contreras, E. Armando. (2019). Ultrasonic dispersion and activation of TiO₂ nanoparticles and its effect on bacterial inhibition in EVA films. *Materials Chemistry and Physics*. 235(), 121760-. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.121760.
- Gob.mx. (2020). Retrieved 24 August 2020, from <https://www.gob.mx/tramites/ficha/licencia-sanitaria-para-establecimiento-de-plaguicidas-y-nutrientes-vegetales/COFEPRIS3540>
- Hawkins, N. J., Bass, C., Dixon, A., & Neve, P. (2018). The evolutionary origins of pesticide resistance. *Biological Reviews*. doi:10.1111/brv.12440
- Jacobson, K., Gunsolus, I., Kuech, T.; Troiano, J., Melby, E., Lohse, S., Hu, D., Chrisler, W., Murphy, C., Orr, G., Geiger, F., Haynes, C., & Pedersen, J. (2015) Lipopolysaccharide density and structure governs the extent and distance of nanoparticle interaction with actual and model bacterial outer membranes. *Environmental science & technology, in press*. doi: 10.1021/acs.est.5b01841
- Kharissova, O.V., et al., The greener synthesis of nanoparticles. *Trends in Biotechnology*, 2013. 31(4): p. 240–248.
- Król A., Pomastowski P., Rafińska K., Railean-Plugaru V., Buszewski B., (2017). Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism. *Advances in colloid and interface science* 249 (2017) 37–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.07.033>
- Kumar, S. (2013). Mode of action of pesticides and the novel trends – A critical review. *International research journal of agricultural science and soil science* (ISSN: 2251-0044) Vol. 3(11) pp. 393–401, DOI: <http://dx.doi.org/10.14303/irjas.2013.118>
- Lohse, S. E.; Abadeer, N. S.; Zoloty, M.; White, J. C.; Newman, L. A.; Murphy, C. J. (2017). Nanomaterial probes in the environment: Gold nanoparticle soil retention and environmental stability as a function of surface chemistry. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 5(12), 11451–11458.
- Li, Z. (2018). A health-based regulatory chain framework to evaluate international pesticide groundwater regulations integrating soil and drinking water standards. *Environment International*. doi:10.1016/j.envint.2018.10.047.
- MacWilliam, L., MacWilliam, A., & Gies, G. (2015). *Guía comparativa de suplementos nutricionales de Nutriserch™ para las Américas*. Vernon, B.C.: Northern Dimensions Publishing.
- Makarova, V.V., Love, A. J., Sinitsyna, O. V., Makarova, S. S., Yaminsky, I. V., Talliansky, M. E., Kalinina, N.

- O. [2014]. “Green” Nanotechnologies: Synthesis of metal nanoparticles using plants. *Acta Nature*. 6(1): p. 35–44.
- Malandrakis, A., Kavroulakis, N., & Chrysikopoulos, C. [2019]. Use of copper, silver and zinc nanoparticles against foliar and soil-borne plant pathogens. *Science of the total environment*, 670, 292–299. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.210
- Mensch, Arielle C., Rodrigo Tapia Hernandez, Joshua E. Kuether, Marco D. Torelli, Z. Vivian Feng, Robert J. Hamers, and Joel A. Pedersen. [2017]. Natural Organic Matter Concentration Impacts the Interaction of Functionalized Diamond Nanoparticles with Model and Actual Bacterial Membranes. *Environmental Science & Technology*, 51, 19: 11075–11084. doi: 10.1021/acs.est.7b02823
- Narendhran S. and Sivaraj, rajeshwari. [2016]. Biogenic ZnO nanoparticles synthesized using *L. aculeata* leaf extract and their antifungal activity against plant fungal pathogens. *Indian academy of sciences*. Vol. 39, No. 1, pp. 1–5.
- Navas, Isabel y García-Fernández, Antonio J. [2020]. *Plaguicidas y biocidas: generalidades, clasificación toxicológica y de riesgos, legislación europea aplicable*. <http://hdl.handle.net/10201/88181>
- Noshad, A., Iqbal, M., Hetherington, C., Wahab H. [2020]. Biogenic AgNPs—A Nano Weapon against Bacterial Canker of Tomato (BCT). *Advances in agriculture*, <https://doi.org/10.1155/2020/9630785>
- Paramo, L. A., Feregrino-Pérez, A. A., Guevara, R., Mendoza, S., & Esquivel, K. [2020]. Nanoparticles in agroindustry: Applications, toxicity, challenges, and trends. *Nanomaterials*, 10(9), 1654. doi:10.3390/nano10091654
- Raghunath, A., & Perumal, E. [2017]. Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future. *International journal of antimicrobial agents*, 49(2), 137–152. doi:10.1016/j.ijantimicag.2016.11.011
- Rojas Avelizapa, N. G., Regalado Infante, P. E., Dávila Lezama, M. del R., Larena Hernández, R. C., & Rojas Avelizapa, L. I. [2020]. Actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata contra bacterias fitopatógenas. *Revista biológico agropecuaria Tuxpan*, 8(2), 1–7. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v8i2.173>
- Sánchez, J., Pérez-sánchez, M., Gómez-olivares, J.L., López-durán, R.M., Montiel-González, J.M., Valencia-Sánchez, R.A., Muñoz-Nava, H., Pérez, G.A., Valencia-Quintana R. [2017]. Inducción de micronúcleos en células meristemáticas de la raíz de Vicia faba tratadas con diferentes concentraciones de marvel®. *Revista tnternacional de contaminación ambiental [especial sobre contaminación y toxicología por plaguicidas (CTP) 95–106*, 2018. DOI: 10.20937/RICA.2018.34.esp01.07
- Sánchez-Bayo, F., Goulson, D., Pennacchio, F., Nazzi, F., Goka, K., & Desneux, N. [2016]. Are bee diseases linked to pesticides? – A brief review. *Environment international*, 89–90, 7–11. doi:10.1016/j.envint.2016.01.009.
- Singh, A., Singh, N. B., Afzal, S., Singh, T., & Hussain, I. [2017]. Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *Journal of materials science*, 53(1), 185–201. doi:10.1007/s10853-017-1544-1
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., ... Mohamad, D. [2015]. Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242. doi:10.1007/s40820-015-0040-x
- Vecitis, C. [2021]. Antiviral-nanoparticle interactions and reactions. *Environmental science: nano*. DOI: 10.1039/D0EN00980F.
- Wang, Xiaoshuang; Xu, Jing; Wang, Xingmin; Qiu, Baoli; Cuthbertson, Andrew G S; Du, Cailian; Wu, Jianhui; Ali, Shaukat. [2019]. Isaria fumosorosea-based zero-valent iron nanoparticles affect the growth and survival of sweet potato whitefly, Bemisia tabaci (Gennadius). *Pest management science*, p. 2174–2181. <https://doi.org/10.1002/ps.5340>

