

Potencial de la nanotecnología en la agricultura

Nanotechnology potential in sustainable agriculture

Recibido: 29 de agosto del 2016
Aceptado: 26 de octubre del 2017
Publicado: 24 de mayo del 2018

Ricardo Hugo Lira Saldivar*^o, Bulmaro Méndez Argüello*, Gladys De los Santos Villarreal**, Ileana Vera Reyes*,***

Cómo citar:

Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villarreal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. doi: 10.15174/au.2018.1575

* Departamento Plásticos en la Agricultura, Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Blvd. Enrique Reya Herosillo No. 140 Col. San José de los Cerritos Saltillo, Coah., México C.P. 25294. Correo electrónico: hugo.lira@ciqa.edu.mx.

** Departamento Síntesis de polímeros, Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

*** Catedrática Conacyt-CIQA.

^o Autor de correspondencia.

Palabras Clave:

Agronanotecnología; nanomateriales; nanofertilizantes; agricultura sustentable.

Keywords:

Agro-nano technology; nano-materials; nano-fertilizers; sustainable agriculture.

RESUMEN

La aplicación de la nanotecnología (NT) en el sector agroalimentario es uno de los campos de más rápido crecimiento en la nano-investigación. Innovar y generar tecnología para producir la cantidad y la calidad de alimentos suficientes para alimentar a una población mundial en rápido crecimiento de los tiempos modernos, siempre será el mayor desafío. El uso excesivo e indiscriminado de agroquímicos sintéticos para incrementar el rendimiento de los cultivos agrícolas conduce al deterioro de la salud del suelo, a la degradación de agroecosistemas, causa problemas relacionados con la contaminación del ambiente y genera resistencia a los pesticidas por insectos y microorganismos fitopatógenos. En este contexto, la NT ha surgido como un avance tecnológico que puede transformar sectores de la agricultura, proporcionando herramientas para la detección rápida de enfermedades en los cultivos, así como mejorar la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes y crecer con mayor velocidad. Con la NT se abre un amplio abanico de oportunidades en la agricultura para producir agroproductos como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, que permitirán incrementar el rendimiento de alimentos de manera sustentable y reduciendo el impacto ambiental. Se espera que esta revisión crítica pueda proporcionar la información básica sobre los antecedentes en la investigación agronano tecnológica, que permita avanzar con la experimentación en las aplicaciones de las nanopartículas en la agricultura ecológica.

ABSTRACT

Application of nanotechnology in the agri-food sector is one of the fastest growing fields in nano-research. Innovating and generating technology to produce the quantity and quality of food, sufficient to feed a rapidly growing world population, will always be the biggest challenge in modern times. The excessive and indiscriminate use of synthetic agrochemicals to increase the yield of agricultural crops leads to the deterioration of soil health, to the degradation of agroecosystems, triggering problems related to environmental pollution and creating resistance to pesticides by many insects and microorganisms. In this context, nanotechnology has emerged as a scientific advance that can transform agricultural sectors, providing tools for the rapid detection of pests and diseases in crops, as well as improving the ability of plants to absorb nutrients, to grow faster and to generate better yields. Nanotechnology opens a wide range of opportunities in agriculture to produce agroproducts such as nano-fertilizers, nano-pesticides, nano-herbicides, and nano-sensors which will allow to increase the yield of food in a sustainable way by reducing the environmental impact. It is expected that this critical review provides the background information on agro-nano technological research, which will allow us to advance with the experimentation on the applications of nanoparticles in ecological farming.

INTRODUCCIÓN

La creciente población mundial demanda alimentos y otros insumos, por lo cual el mayor desafío que enfrentan los investigadores agrícolas en el siglo XXI es innovar y generar tecnología para producir la cantidad y calidad de comida suficiente para alimentar a la creciente población mundial, pero sin degradar la salud del suelo y de los agroecosistemas (Bharadwaj, 2016). Esto implica que el paradigma de la llamada "Revolución Verde" sea replanteado, pero con un enfoque de sustentabilidad de los agroecosistemas (Shiva, 2016). Se ha estimado que la producción mundial de alimentos debe aumentar entre 70% y 100% para el año 2050 para poder satisfacer la demanda cada vez mayor de la población que continúa en constante aumento (Tomlinson, 2013). Sin embargo, la producción agrícola sigue siendo atacada por una gran cantidad de plagas de insectos, enfermedades y malezas. Se estima que los insectos plaga pueden reducir el rendimiento de los cultivos entre 10% y 40%. Actualmente, ha sido señalado que las malezas, las plagas y las enfermedades causan pérdidas anuales de 248 000 millones de dólares en la agricultura mundial (Fried, Chauvel, Reynaud & Sache 2017).

Para tratar de evitar estas pérdidas y mejorar la productividad, los agricultores están haciendo un uso excesivo e indiscriminado de agroquímicos sintéticos, lo cual conduce al deterioro de la salud del suelo, degradación de agroecosistemas, a la generación de problemas relacionados con el manejo de residuos, contaminación del ambiente y la resistencia creciente a los pesticidas por los insectos y patógenos. Por lo tanto, existe la urgente necesidad de cambiar la forma en la que usamos los agroquímicos tradicionales por otros que sean más amigables con el medio ambiente. Estos cambios hacia la agricultura sustentable o ecológica de menor impacto ambiental pueden incluir: 1) la utilización racional de pesticidas y fertilizantes; 2) la detección y el control rápido y preciso de plagas y patógenos, así como de pesticidas y los niveles de nutrientes en suelo y plantas; 3) la promoción de una mejor salud del suelo, evitando su degradación por el uso de agroquímicos convencionales (Kashyap, Xiang & Heiden, 2015).

En este contexto, la nanotecnología (NT) ha surgido como un avance tecnológico-científico que puede transformar sectores de la agricultura proporcionando herramientas novedosas para la detección molecular de estrés biótico y abiótico (figura 1), así como para la detección rápida de enfermedades fitopatógenas y el mejoramiento en la capacidad de las plantas para absorber el agua, los nutrientes y los pesticidas (Khot, Sankaran, Maja, Ehsani & Schuster, 2012; Nuruzzaman, Rahman, Liu & Naidu, 2016). Además de esto, la nanobiotecnología también puede mejorar nuestra comprensión de la biología de los cultivos y, por lo tanto, potencialmente puede mejorar sus rendimientos o valores nutricionales (Fraceto et al., 2016). La NT

también ofrece una gran oportunidad en la industria agro-alimenticia moderna, aunque no se debe perder de vista que también puede generar algunos riesgos debido a la incorporación de nanocompuestos o nanopartículas en el ambiente y los alimentos, ya que eso causa problemas en la salud y calidad de los alimentos (Handford et al., 2014). Por lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo de revisión es mostrar y poner en el contexto global actual las aplicaciones potenciales que ofrece la NT para el control de plagas y enfermedades para la generación de nuevos agronano insumos que incrementen la producción de alimentos y que ayuden a reducir el impacto ambiental de los agroinsumos sintéticos tradicionales.

La nanotecnología y sus aplicaciones en agricultura sustentable o ecológica

Los nanosensores y sistemas de suministro inteligentes basados en nano productos son algunas de las aplicaciones de la NT, mismos que ya se emplean en el sector agrícola para ayudar a combatir los patógenos de los cultivos, reducir al mínimo las pérdidas de nutrientes en la fertilización y mejorar la productividad de los cultivos a través de la optimización del uso del agua y nutrientes (Dubey & Mailapalli, 2016; Rameshaiah & JPallavi, 2015). Las nanopartículas (NPs) también son utilizadas para mejorar la eficiencia de los plaguicidas al aplicar en el campo menores dosis (Patil, Borase, Patil, Salunkhe & Salunke, 2012). Dispositivos derivados de la nano y bio tecnología también se están explorando para hacer más eficiente el manejo agronómico de los cultivos, así como para la transformación genética de plantas (transgénicos), al crear nuevas variedades tolerantes y/o resistentes a factores bióticos y abióticos (Prasad, Kumar & Prasad, 2014; Torney, Trewyn, Lin & Wang, 2007).

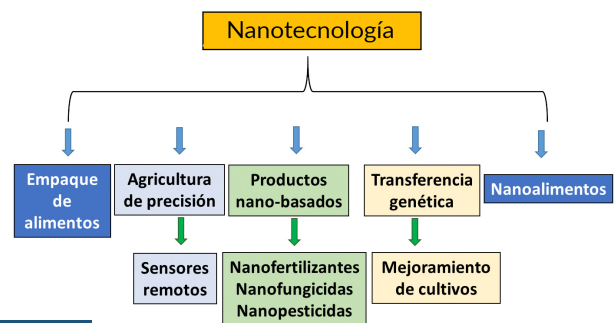


Figura 1

Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura moderna de precisión y en aspectos relacionados con la producción de alimentos. Las nanopartículas metálicas como cobre, zinc, hierro y plata; y las derivadas del carbono tienen notables efectos fisiológicos y bioquímicos en las plantas, por lo que también pueden tener aplicaciones en los envases para recubrimientos de alimentos para extender la vida de anaquel o poscosecha, como para usarse en nanosensores, nanopesticidas, nanofertilizantes y para el mejoramiento genético de plantas.

Fuente: Elaboración propia.

Entre los avances de la NT para la agricultura se pueden destacar los siguientes: encapsulamiento de ingredientes activos como fertilizantes, herbicidas, fungicidas, insecticidas y nutrientes, los cuales se pueden incorporar en matrices de liberación lenta o controlada en materiales naturales como la zeolita (Lateef *et al.*, 2016). Este mineral aluminosilicato representa una de las opciones más prometedoras y viables para hacer frente a los retos actuales en el ámbito de la agricultura sustentable y la seguridad alimentaria, especialmente de cara a los retos del cambio climático (Hidayat, Fadillah, Chasanah, Wahyuningsih & Ramelan, 2015). Se ha demostrado que la encapsulación de los ingredientes activos en NPs aumenta la eficacia de sus ingredientes químicos, ya que permiten reducir su volatilización, lixiviación y se puede reducir la toxicidad y contaminación de los agroecosistemas usando estos nanoproductos (Cota, Cortez, Burgos, Ezquerro & Plascencia, 2013).

Antecedentes de la nanotecnología

La NT ha estado presente en la civilización desde la antigüedad y con el paso del tiempo ha ido creciendo a pasos agigantados, particularmente a partir de la década de 1980 y manteniéndose hasta la fecha (Hulla, Sahu & Hayes, 2015). Los orígenes de la NT se remontan a los resultados de investigación generados por el físico estadounidense Richard Phillips Feynman, ganador del premio Nobel de Física, quien en 1959 ante la Sociedad Americana de Física impartió la conferencia "Hay mucho sitio en el fondo". En aquella conferencia, Feynman propuso manipular y fabricar artefactos con la precisión de unos pocos átomos, a pesar de dicho razonamiento, esas ideas permanecieron estancadas y sin prosperar por mucho tiempo.

Paulatinamente se han producido algunos acontecimientos importantes que crearon los cimientos para el desarrollo actual de la NT, entre ellos se encuentran los siguientes eventos: 1) En 1974 se produjo el primer registro de una patente para la protección de datos mediante un dispositivo molecular fabricado por Aviram y Seiden de la corporación IBM. 2) En 1982 el suizo Gerd Binnig y el alemán Heinrich Rohrer inventaron el microscopio de barrido de efecto túnel, el cual permite ver objetos de tamaño nanométrico. 3) En 1985 Harold Kroto, Robert Curl y Richard Smalley descubrieron una de las formas estables en la configuración de átomos de carbono, o sea, las jaulas esféricas con 60 átomos de carbono conocidas como fullerenos o bucky balls en honor a Buckminster Fuller, diseñador de la cúpula geodésica o balón de fútbol (figura 2). Posteriormente, en 1986, los inventores del microscopio de barrido fueron galardonados con el premio nobel de física por sus descubrimientos sobre microscopía de barrido de túnel. 4) En 1986, Eric Drexler publicó el libro "Los motores de la creación" con una amplia visión de futuro de

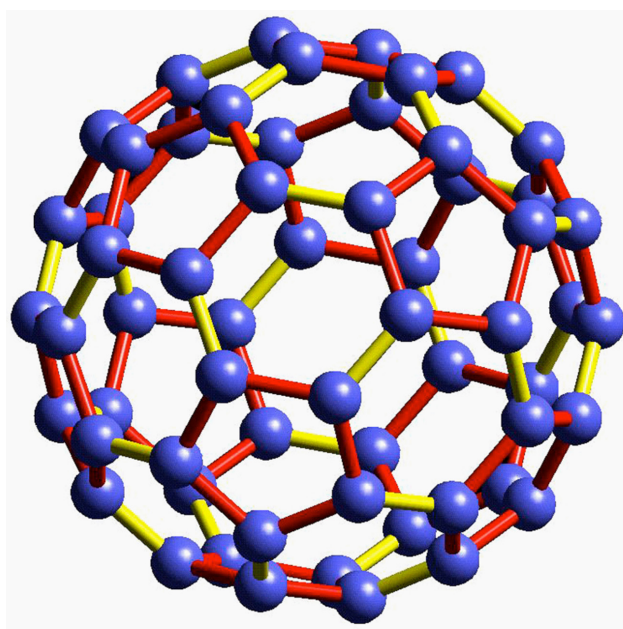


Figura 2

Representación esquemática de la nanopartícula llamada fullereno o bola de Buckminster conteniendo 60 carbonos. Los fullerenos son moléculas tridimensionales estables y muy resistentes, las cuales están constituidas exclusivamente por un número definido de átomos de carbono, donde las más comunes son el C_{60} y C_{70} .

Fuente: Elaboración propia.

lo que se llamaría nanotecnología molecular. 5) En 1989, dos científicos de la compañía IBM hicieron posible la grabación de datos a escala nanométrica.

En 1991 el japonés Sumio Iijima informó de la existencia de unas nanopartículas (NPs), que luego fueron llamadas nanotubos de carbono (NTC), ampliamente usados en la investigación de actualidad, incluyendo diversos experimentos en cultivos agrícolas (Khodakovskaya, de Silva, Biris, Dervishi & Villagarcía, 2012; Kodakovskaya *et al.*, 2013). Por otro lado, la aplicación de la NT en la agricultura y en la industria alimentaria se discutió por primera vez en el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) en septiembre de 2003 (Weiss *et al.*, 2006).

Multidisciplinas involucradas en el desarrollo nanotecnológico

La NT ha evolucionado a través del tiempo mediante la aportación interdisciplinaria de ideas y propuestas emanadas de la biología, química, física, ingeniería y la medicina; donde se conjuntan estrategias que están permitiendo diseñar, sintetizar y fabricar materiales y dispositivos electrónicos bajo pedido especial. Estos materiales tienen

propiedades mejoradas o completamente nuevas (Smith & Lyshevski, 2016). La biología y biotecnología son ciencias que tiene una función clave en la NT. Por ejemplo, sabiendo que una salamandra se adhiere a la pared gracias a la presencia de nanoestructuras en sus dedos es posible diseñar nuevos adhesivos usando esa tecnología. Estos conocimientos han permitido idear tejidos inteligentes que no se mojan y que se usan en modernas e innovadoras prendas de vestir (Indrová *et al.*, 2015).

La aplicación de la NT en la agricultura y la industria de alimentos también están recibiendo mucha atención en la actualidad. Las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento debido a sus beneficios potenciales, los cuales incluyen desde la mejora en la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas hasta un mejor procesamiento y mayor valor nutricional de los mismos (Dasgupta *et al.*, 2015). Mientras que la mayor inversión en NT se realiza en los países desarrollados, los avances de investigación ofrecen una visión de potenciales aplicaciones en la agricultura y la alimentación de todo el mundo y, en especial, para zonas marginadas, que podría tener un impacto significativo en las poblaciones rurales de los países en desarrollo (Prasad *et al.*, 2014).

Producción o síntesis de nanopartículas y principales aplicaciones en la industria

Existen algunos tipos de NPs que son producidas o sintetizadas por diversos procesos industriales como la pirólisis, permitiendo la producción de materiales a gran escala como el humo de sílice por procedimientos con altas temperaturas. También hay NPs de óxido de titanio y metales ultra finos empleados en los procesos de combustión (diésel, carbón, etc.) en los procesos domésticos, así como en la obtención de pigmentos (Rauta & Sahoo, 2015).

Las nanoestructuras con un tamaño de escala menor a 100 nanómetros (nm) pueden ser preparadas por descomposición no isotérmica en una atmósfera oxidante. Así, por ejemplo, las nanoestructuras de sílice se pueden sintetizar a partir de la cáscara de arroz obteniendo un polvo uniforme ultrafino. Los nanohilos o nanoalambres pueden ser sintetizados por muchos procesos. Recientemente, los nanoalambres amorfos de SiO_2 se han sintetizado a partir de un método vapor-líquido-sólido usando galio (Ga) como catalizador y como fuente de sustrato al silicio (Si), obteniéndose nanoalambres de SiO_2 muy finos, con diámetros de 50 nm a 100 nm y longitudes de 10 μm a 50 μm (Pukird *et al.*, 2017).

Hay NPs como las metálicas y minerales que se generan mediante la ingeniería de síntesis, en las que para su obtención se utilizan dos tipos de métodos: (1) El llamado

top-down (de arriba hacia abajo), en los que se producen nanomateriales sometiendo materia prima convencional a diversos procesos, y (2) el *bottom-up* (de abajo hacia arriba) en los que se construyen NPs a partir de átomos o moléculas mediante precursores y síntesis química (Cai *et al.*, 2015). Las NPs ya sea en forma de nanopolvos, nanoracimos o nanocristales, son partículas microscópicas de tamaño menor a 100 nm. Actualmente, las NPs son un área de intensa investigación científica debido a una amplia variedad de aplicaciones potenciales en los campos de la biomedicina, óptica electrónica, en la agricultura y la industria de alimentos (Kulkarni *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2015). Sin embargo, también es necesario señalar que existen riesgos en la utilización de las NPs debido a que por su tamaño pueden atravesar las paredes y membranas celulares pudiendo ocurrir una estrecha interacción con las biomoléculas u organelos celulares, aunque no se comprenden por completo los efectos de dichas interacciones, son objeto de diversas investigaciones en todo el mundo. Por ejemplo, los fullerenos y nanotubos de carbono se pueden unir a sitios activos de ciertas enzimas como la glutatión S transferasa y suprimir su función en animales y plantas (Robles & Cantú, 2017).

Aplicaciones de diversas nanopartículas en la agricultura e industria alimentaria

Los científicos agrícolas se enfrentan a una amplia gama de desafíos como el estancamiento en el rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de macro y micronutrientes, la disminución de materia orgánica del suelo, carencias multinutricionales, el cambio climático, la reducción de la disponibilidad de tierras cultivables, así como la escasez de agua y mano de obra para el campo (Shiva, 2016). Para hacer frente a estos problemas, la NT encuentra aplicación en la necesidad de explorar el uso de diversos tipos de nanomateriales en contenedores de alimentos (Echegoyen & Nerín, 2013). Esto tiene como finalidad preservarlos del ataque de microorganismos patógenos. Además, otro tipo de nano sensores permiten precisar, detectar y entregar la cantidad correcta de nutrientes y plaguicidas que promueven la productividad sustentable utilizando diversos tipos de NPs (Ghormade *et al.*, 2015; Subramanian *et al.*, 2015). En la figura 3 se muestra un esquema que ilustra las diferentes aplicaciones potenciales de la NT en numerosos aspectos de la agricultura moderna.

Las NPs ya sean metálicas derivadas del carbón u otros materiales como arcillas, etc., pueden emplearse en muchos aspectos como la agricultura y el procesamiento higiénico de alimentos para generar incrementos en la eficiencia de los agroinsumos y para reducir significativamente las cantidades de productos por aplicar, así como para la elaboración de productos alimenticios con mejores sabores, aromas y texturas (Singh *et al.*, 2015).

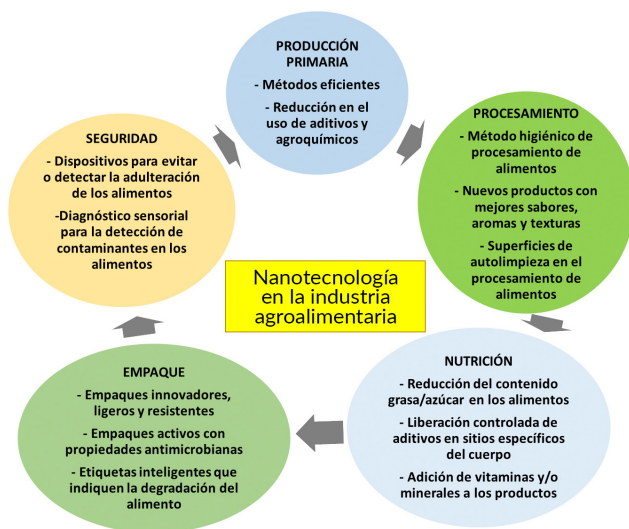


Figura 3

Empleo de la nanotecnología en la industria alimentaria, lo cual involucra el procesamiento de alimentos; la elaboración de productos con mejores sabores y aromas; la liberación controlada de aditivos, así como para la producción de empaques inteligentes conteniendo sensores de microorganismos patógenos; generación de nanopesticidas para reducir el uso de agroquímicos convencionales y la liberación controlada de micronutrientes en sitios específicos de la planta. Las NPs también se pueden utilizar para capturar o retener metales pesados para el tratamiento de suelos y aguas residuales.

Fuente: Elaboración propia.

El uso principal de las NPs metálicas de cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), plata (Ag), titanio (Ti) y otras, en la agricultura e industria alimentaria, se debe principalmente a su actividad antimicrobiana. Por ejemplo, el dióxido de Ti es un colorante alimenticio que puede utilizarse como barrera de protección en el envasado de consumibles (Zhang, Su, Zhao & Tan, 2008). En el caso de semillas y plantas Adhikari, Kundu & Rao (2016) encontraron un efecto positivo y promotor de la germinación al observar que las NPs de zinc pueden penetrar el tegumento de las semillas y estimular favorablemente respuestas fisiológicas y bioquímicas. Por su parte, las NPs de plata son utilizadas como agentes antimicrobianos (Aouada & de Moura, 2015; Prabhu & Poulouse, 2012); además se aplican a paneles de refrigeradores y frigoríficos, así como en los recipientes o contenedores de almacenamiento, líneas de envasado y otras superficies destinadas a entrar en contacto con los alimentos (Echegoyen & Nerín, 2013). Por su parte, las NPs orgánicas (micelas, vesículas, liposomas, dendrímeros, cápsulas, etc.), se emplean en humanos como antimicrobianos y para mejorar el valor nutritivo de los alimentos utilizándose como vehículos para encapsulación y posterior liberación gradual o controlada de medicamentos, vitaminas y otros nutrientes incorporados en las nanocápsulas (Perni et al., 2015).

Respecto al sector agrícola, diversos experimentos se han realizado para conocer el tamaño óptimo, forma y concentración de las NPs para que sean aplicadas a las plantas tratando de mejorar su penetración y translocación vascular por los haces vasculares del xilema y floema (Da Costa & Sharma, 2016; Ebbs et al., 2016). Las NPs pueden penetrar los tejidos vegetales cuando se aplican sobre las hojas de las plantas en forma de aerosol o aspersión (Wang, Tarafdar & Biswas, 2013), penetrando por los estomas y desplazándose luego por el floema hacia diferentes tejidos de las plantas (Jalali, Ghanati, Modarres-Sanavi & Khoshgoftarmansh, 2017). También se pueden aplicar a la zona de las raíces mediante el riego y de esa manera las NPs se pueden desplazar por el sistema conductivo del xilema (López-Moreno et al., 2016). Algunos resultados revelan que solo el 14.7% del nanomaterial aplicado a las plantas se pierde al usar la técnica de aspersión o aerosol, en comparación con la pérdida de 32.5% o más con los productos agrícolas convencionales (Hawthorne et al., 2014).

Numerosos estudios revelan que concentraciones o dosis de NPs menores a 5 ppm pueden promover mayor crecimiento de las plantas. El tamaño de las NPs es un factor que interviene en su penetración y translocación en el interior de los tejidos vegetales, por lo tanto, a mayor tamaño de NPs menor será la penetración en las plantas (Adhikari et al., 2016; Cota et al., 2014). Otros autores señalan que, por lo que se refiere a nanofertilizantes, es recomendable utilizar NPs con tamaños menores a 20 nm (Sairam & Gangurde, 2016) para que al ser aplicadas foliarmente puedan penetrar fácilmente al interior de las plantas mediante la apertura de los estomas, los cuales tienen tamaños micrométricos fluctuando en el rango de 10 µm a 60 µm (Fricker & Willmer, 2012).

Las NPs de Cu han atraído la atención en los últimos años por ser un metal semiconductor muy abundante, que tiene excelentes propiedades físicas, químicas y antibacteriales (Carrillo et al., 2016; Shende, Ingle, Gade & Rai, 2015). El cobre ha sido de interés particular porque a diferencia de otros metales antimicrobianos presenta un amplio espectro de acción contra hongos y bacterias fitopatógenas (Betancourt et al., 2014; Lira et al., 2015). El factor responsable de las propiedades antimicrobianas del cobre es la habilidad que tiene para aceptar o donar electrones, ya que tiene un nivel alto de oxidación catalítica y una reducción potencial alta. Cuando el Cu está en un estado de oxidación, es altamente efectivo como antimicrobiano debido a la interacción con ácidos nucleicos, sitios activos enzimáticos y componentes de la membrana en células que causan la enfermedad (Cioffi et al., 2005).

El estudio de Kvitek et al. (2009) demostró que las NPs Ag tienen un efecto significativo bactericida contra *Paramecium caudatum*. La plata posee propiedades antibacterianas

naturales, mismas que son reforzadas cuando este metal forma NPs con tamaño de 10 nm a 20 nm. Se ha determinado mediante imágenes de microscopía electrónica de transmisión, los daños que causan las NPs Ag a la membrana celular y algunos elementos del citoplasma (figura 4). Aunque aún no se ha podido descifrar si la plata tiene uno o varios blancos de ataque, se cree que su alta reactividad con compuestos de azufre la hace reaccionar con enzimas localizadas en la membrana, las cuales contienen éste elemento (Morones *et al.*, 2005). Las mitocondrias celulares son las responsables de la respiración y del control de intercambio de materiales intracelular y luego con el ambiente externo, esto implica que la membrana al perder permeabilidad y que se reduzcan los niveles de adenosina trifosfato (ATP), entonces la bacteria no es capaz de efectuar los procesos de respiración y eventualmente muere (Hajipour *et al.*, 2012; Mukherjee *et al.*, 2014).

Además se ha demostrado que las NPs Ag reducen la necesidad de lavar frecuentemente los tejidos de tela usada en prendas de vestir, ya que las bacterias que están en la piel de quien usa la prenda son eliminadas y al ser tan pequeñas las partículas que ocupan los espacios de las fibras, evitan la acumulación de todo tipo de suciedad y manchas (Reed *et al.*, 2016). Estos autores demostraron la eficacia antimicrobial de las NPs Ag durante numerosos ciclos de lavado de prendas de uso cotidiano, ya que los iones de plata se liberaron de la tela cuando fue lavada con y sin detergente, afectando así el crecimiento de la bacteria *Escherichia coli*. Por lo tanto, los textiles de algodón, lino, lana y otras materias generadas por la agroindustria son otra gran oportunidad de desarrollo para las NPs (Afzali & Maghsoodlou, 2016). Hay algunas NPs que no permiten la penetración de líquidos, porque se adhieren con ganchitos nanométricos a filamentos de las fibras textiles, impidiendo que los líquidos penetren a través de la tela (Quintili, 2012).

Usos de los nanotubos de carbón y grafeno en la agricultura

El carbono es uno de los elementos más comunes que existen en la naturaleza, se presenta en varias formas, algunas de ellas son el diamante, el grafito, los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafeno (Serag *et al.*, 2011). Actualmente, los nanotubos de carbono (NTC) son considerados como una nueva forma de carbono puro, como hojas enrolladas de grafito con una red hexagonal unida por átomos de carbonos, las cuales existen de dos tipos: de pared simple, pareciendo ser como un cilindro y de paredes múltiples o multiparedes, consistiendo de muchos cilindros anidados, cuyos radios sucesivos difieren en el espacio entre capas de grafito (Ayutsede *et al.*, 2006).

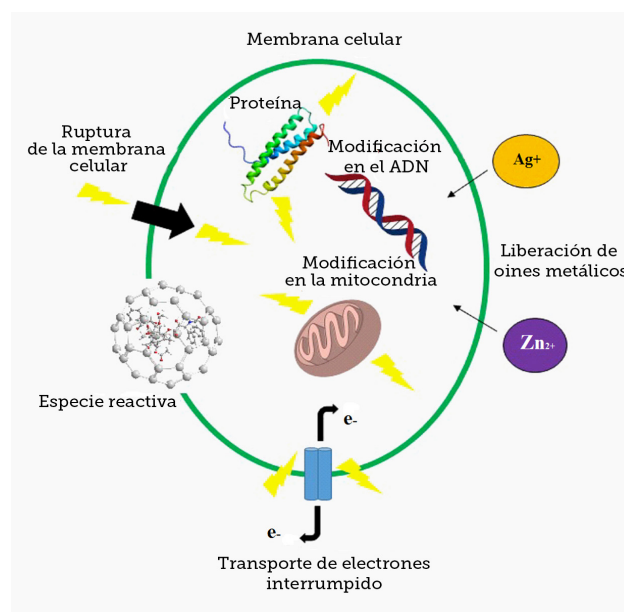


Figura 4

Esquema que ilustra el efecto antibacteriano de las nanopartículas de plata en las membranas, mitocondrias, organelos celulares, el ADN nuclear, así como en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que se generan como respuesta a las nanopartículas cuando penetran al interior de las células. El mecanismo antibacteriano de las NPs puede ser debido a un aumento en la generación de ROS intracelular, lo que provoca estrés oxidativo a las células bacterianas. También se pueden adherir a la membrana celular, con lo que alteran su permeabilidad y funciones respiratorias, asimismo, interactúan con la superficie de las membranas y penetran en el interior celular, causando daño a los diferentes organelos y a nivel del ADN en el núcleo.

Fuente: Elaboración propia.

Los NTC poseen una correcta combinación de propiedades: un diámetro nanométrico, integridad estructural, alta conductividad eléctrica y estabilidad química, lo cual los hace que tengan múltiples usos potenciales incluyendo en células vegetales y, por ende, en las plantas cultivadas (Serag *et al.*, 2011). Las aplicaciones de los NTC en el campo de la biotecnología son variadas e incluyen a los NTC como componentes de ADN, proteínas y como biosensores, bloqueadores de canales iónicos; para usarse en biocatálisis, neurociencias e ingeniería de tejidos, etc. (Enyashin, Gemming & Seifert, 2007).

En el campo de la agricultura, los NTC han sido utilizados para promover el crecimiento de las plantas, tal como lo demostró Cañas *et al.* (2008) al estudiar su efecto en seis especies de plantas (repollo, zanahoria, pepino, lechuga, cebolla y tomate). Ellos encontraron que los NTC de pared sencilla estimularon el crecimiento de algunas de esas especies. Otros resultados han sido generados por investigadores de la Universidad de Arkansas en el Centro de Nanotecnología de Little Rock, Arkansas, E.E.U.U., quienes

han descubierto que células de plantas de tabaco se desarrollan con mayor velocidad (Khodakovskaya *et al.*, 2012) debido al efecto de los NTC multiparedes; asimismo, se ha verificado que la exposición de semillas de tomate a estos NTC hace que las semillas germinen más rápido y que las plantas de esta hortaliza crezcan más y alcancen mejores rendimientos (Khodakovskaya *et al.*, 2013).

El trabajo de Villagarcía, Dervishi, de Silva, Biris & Khodakovskaya (2012) reveló que los NTC promovieron el crecimiento de plantas de tomate tratadas, ya que los nanotubos se comportaron como canales de agua dentro de las plantas, lo cual promovió mayor presión hidrostática y turgor dentro de las células; consecuentemente esto generó elongación celular y mayor crecimiento vegetal. En el trabajo de Saxena, Maity & Sarkar (2014) se reporta que NPs de carbón obtenidas de un subproducto agrícola llamado biochar son capaces de liberar lentamente nutrientes catiónicos y aniónicos con el paso del tiempo, logrando promover el crecimiento de plantas de trigo. Eso se correlaciona con la acción de refuerzo que tienen las NPs de carbón en el suministro de nutrientes a las plantas jóvenes. Por lo tanto, esas NPs pudieran ser una mejor opción que el fertilizante o abono solo debido a la liberación lenta o controlada de nutrientes, permitiendo una mejor asimilación por las plantas y con mayor eficiencia de aplicación, absorción y utilización.

Por otra parte, el óxido de grafeno (OG) es otro material derivado del carbón, el cual se presenta como una lámina de grafeno funcionalizada con diferentes grupos oxigenados que se puede emplear como precursor del grafeno o como un material grafénico en sí mismo. Es un buen aislante, higroscópico, con alto contenido de oxígeno y muy hidrofílico (Wang *et al.*, 2012). El OG se dispersa fácilmente en agua mediante el empleo de ultrasonido o con agitación mecánica. También puede suspenderse en disolventes orgánicos como el dimetilformamida, N-metilpirrolidona o el tetrahidrofurano, porque es anfifílico, una propiedad de los tensoactivos que pueden funcionar de manera dual: o sea atrayendo y repeliendo el agua.

Los grupos hidroxilo, epoxi y carbonilo presentes en la estructura del OG hacen que este sea muy hidrofílico, de tal forma que las moléculas de agua absorbidas tienden a acumularse entre las láminas del OG, incluso después de largos periodos de secado. Esto puede dar lugar a la formación de enlaces por puentes de hidrógeno entre los grupos oxigenados y las moléculas de agua, lo que tendrá una gran influencia en sus propiedades electrónicas, mecánicas y estructurales (Ganesh, Isloor & Ismail, 2013).

El OG actúa como un material aislante, aunque su conductividad depende de sus propiedades químicas y estructurales. Sin embargo, al reducirlo para obtener grafeno

(óxido de grafeno reducido [rOG]) sus propiedades cambian, por lo que puede llegar a ser un semiconductor como el grafeno. Además, las láminas de OG se pueden incorporar en cualquier sustrato para después de ser reducido o no, según la aplicación posterior, pudiendo ser empleado en la fabricación de elementos electrónicos flexibles, sensores químicos, nanosensores para fines agrícolas, etc. (Robinson, Perkins, Snow, Wei & Sheehan, 2008).

Se ha demostrado que las NPs de OG son antibacteriales (Liu, Liu, Wang, Yan & Sun, 2011), por lo que podrían tener múltiples aplicaciones en la industria alimentaria. El OG puede reaccionar con moléculas químicas para la incorporación de diversos grupos funcionales, lo que abre la puerta a un sinnúmero de aplicaciones agrícolas ya sea como portador de agroquímicos o fármacos, o en el área de la fotocatalisis (Mukherjee *et al.*, 2016). En el sector agrícola, diversos autores reportan que estos nanomateriales grafénicos inducen mejor crecimiento de las plantas (Chakravarty, Erande & Late, 2015; Cheng *et al.*, 2016; Jiao *et al.*, 2016); en semillas promueven mejor germinación y vigor de las plántulas (Chakravarty *et al.*, 2015).

Empleo de nanopartículas diversas como plaguicidas

La NT puede ofrecer alternativas verdes y ecológicas para el manejo sustentable de enfermedades fitopatogénicas al usar ciertas NPs metálicas, así como microorganismos benéficos que se pueden incorporar a NPs o a matrices zeolíticas, las cuales pueden actuar como portadores de los organismos y NPs para posteriormente ser liberados gradualmente. Es por eso que aparte de ser respetuosos del ambiente, algunos hongos antagonistas de patógenos se utilizan como unidades de biofabricación, pudiendo proporcionar un beneficio añadido por ser fáciles de usar, en comparación con otros microbios. La naturaleza no patogénica de algunas especies de hongos, en combinación con la simplicidad de producción y manejo, mejorará la fabricación en masa de NPs cargadas o funcionalizadas con nutrientes o agentes biológicos para apoyo de la agricultura ecológica o sustentable (Alghuthaymi, Almoamar, Rai, Said-Galiev & Abd-Elsalam, 2015).

Los plaguicidas se dividen en subcategorías según el destino de acción específica, ya sea para destruir totalmente a las plagas o para hacer resistentes a las plantas. Estas categorías incluyen herbicidas que actúan sobre las malezas; insecticidas para el control de plagas; fungicidas y bactericidas contra el ataque de microorganismos causantes de enfermedades y para prevenir que se sigan propagando. La preparación de pesticidas a base de nanoencapsulados, hace que la liberación sea más lenta y controlada (Sun *et al.*, 2014), aumentando así su nivel de acción y, por ende, una disminución del producto o ingrediente activo por aplicar, lo cual causa menor impacto

ambiental y además se mejora su solubilidad al aplicarlo en el suelo para tener una mayor disponibilidad en las plantas (Kah, 2015; Shang, Feng & Zheng, 2006).

El trabajo realizado por Sarlak, Taherifar & Salehi (2014) demostró que al mezclar ácido cítrico con NTC multiparedes se tuvo mejor control del hongo *Alternaria alternata*, en comparación con el efecto de fungicidas sintéticos comerciales como el Zineb y Mancozeb, los cuales son fungicidas de amplio uso en la agricultura tradicional. Esto sugiere que los NTC pueden ser empleados como fungicidas en la agricultura moderna de la "Nueva Revolución Verde", pero aplicándolos en muy bajas dosis, lo cual reduciría los costos y el impacto negativo a los agroecosistemas.

Las NPs también están siendo empleadas como antimicrobiales para el control de enfermedades de plantas, como promotores de germinación y crecimiento vegetal, así como nanofertilizantes (Liu & Lal, 2015). Los resultados reportados por Subramanian, Muniraj & Uthandi (2016) señalan que algunos actinos bacterias están involucrados en la solubilización y movilización de nutrientes, en particular de fosfatos y hierro, además de facilitar la fijación biológica de nitrógeno en simbiosis con micorrizas. Recientemente, muchos informes de investigación sugieren que los actinos bacterias son capaces de producir NPs de óxidos metálicos, los cuales pueden ser explotados en la síntesis sustentable de nanomateriales y ser utilizados en sistemas biológicos.

La aplicación de pesticidas, fertilizantes, antibióticos y nutrientes en el sector agropecuario suele ser por aspersión al follaje de las plantas o al suelo mediante el sistema de riego para que sean luego transportadas de forma ascendente o descendente, por el sistema vascular de las plantas. En la agricultura moderna las NPs metálicas o derivadas del carbono también pueden aplicarse o dosificarse al suelo por medio de los sistemas de fertiriego, lo cual provoca una diversidad de respuestas fisiológicas y bioquímicas en las plantas. En este contexto, la NT también ofrece una gran oportunidad para desarrollar nuevos productos contra plagas, como ha sido demostrado recientemente por Le Van et al. (2016). Ellos reportaron el efecto insecticida de NPs metálicas de óxido de cobre a bajas concentraciones, se menciona que este mineral incrementa la expresión de la proteína tóxica de *Bacillus thuringiensis* en plantas de algodón transgénico. Sin embargo, esos autores también consignaron un efecto adverso, ya que dichas NPs redujeron significativamente la absorción de nutrientes como B, Mo, Mn, Mg, Zn y Fe, por las plantas de algodón.

Investigadores de la Universidad Estatal de Iowa han utilizado NPs de sílice mesoporosa (MSN) con tamaño de 3 nm como acarreadores y para la entrega de ADN y sustancias

químicas en el interior de células vegetales aisladas. Las NPs MSN son químicamente recubiertas y sirven como contenedores de genes que luego son aplicados a las plantas. Este recubrimiento provoca que la planta pueda tomar las partículas a través de las paredes y membranas celulares donde se insertan, activando los genes biológicos de una manera precisa y controlada, sin provocar ningún efecto secundario tóxico después. Esta técnica se ha aplicado con éxito para introducir NPs en calabazas y ADN a plantas de tabaco y maíz (Corredor et al., 2009).

Actualmente novedosos dispositivos como los nanosensores se consideran que tendrán la capacidad de detectar y tratar una infección por hongos o bacterias, una deficiencia de nutrientes, o cualquier otro problema de sanidad vegetal, mucho antes de que aparezcan síntomas visibles en las plantas (Fraceto et al., 2016; Rai, Acharya & Dey, 2012). El trabajo de Pérez & Rubiales (2009) puso de manifiesto que la NT está abriendo nuevas aplicaciones potenciales para la agricultura, las cuales ya están siendo exploradas. Estos autores también señalan el potencial de la NT para desarrollar nanodispositivos y nanotransportadores para usarse como sistemas inteligentes para atacar sitios de emisiones químicas específicas en las plantas.

El oro nanométrico con tamaños de 5 nm a 25 nm fue usado para entregar e incorporar ADN en células vegetales, mientras que el óxido de hierro de 30 nm se empleó en nanosensores para detectar pesticidas en concentraciones muy pequeñas. Estas funciones ayudan al desarrollo de la agricultura de precisión, reduciendo al mínimo la contaminación y permitiendo maximizar las prácticas agrícolas sustentables (Malsch, Subramanian, Semenzin, Hristozov & Marcomini, 2015; Subramanian et al., 2015).

Nanopartículas empleadas como herbicidas

Uno de los problemas típicos en el manejo de los cultivos en la agricultura es la presencia de malezas, fuente principal de hospederos para la propagación de plagas vectoras de virus y enfermedades. Para combatir este tipo de problemas se ha optado por emplear nanoherbicidas (Mehrazar, Rahaie & Rahaie, 2015), dado que algunas NPs tienen como objetivo específico destruir malezas, se logra evitar competencia con las plantas cultivadas para conseguir mayores rendimientos (Prasad et al., 2014). Los nanoherbicidas se están desarrollando para hacer frente a los problemas en el manejo de malezas perennes y el banco de semillas del suelo. La remediación de la contaminación ambiental provocada por residuos industriales y productos químicos agrícolas como pesticidas y residuos de herbicidas es posible usando nanopartículas metálicas (Yadav & Srivastava, 2015). Las aplicaciones actuales de diversas NPs como herbicidas son relativamente pocas, debido a que apenas están surgiendo resultados de investigación

concluyentes. Sin embargo, una serie de productos y aplicaciones en los sectores agrícolas impulsados por la NT han ido aumentando constantemente en los últimos años y se prevé que crezca en el futuro para apoyar de manera importante el desarrollo de la agricultura ecológica (Kumar *et al.*, 2015).

También se han realizados estudios respecto a la liberación controlada de herbicidas para limitar el daño que causan a humanos y ecosistemas. Ya se han utilizado nanoencapsulados de herbicidas a base de atrazina, triazina y ametrina, los cuales fueron probados y obtuvieron 84% de eficiencia en su liberación hacia las plantas (Grillo, Rosa & Fraceto, 2015). La atrazina es un herbicida utilizado ampliamente para eliminar malezas. Su uso continuado ocasiona que los suelos pierdan nutrientes y causan la generación de resistencia por las plantas. Campos de Oliveira & Fraceto (2014) han consignado que la aplicación de carboximetilcelulosa, la cual se emplea en detergentes y como auxiliar en la degradación de fertilizantes que son altamente contaminantes, al ser modificada con NPs Ag hace que la degradación del herbicida sea mucho más fácil y efectivo contra las malezas.

Nanopartículas como fertilizantes y promotores del crecimiento vegetal

En la agricultura moderna tradicional la aplicación excesiva de fertilizantes como nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K) afectan los suelos y las aguas subterráneas, ocasionando eutrofización de sistemas acuáticos y de pozos de agua usados para consumo humano y el riego (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) (2010), México entre 2009-2013 consumió 5.8 millones de ton de fertilizantes nitrogenados, 1.6 millones de ton de fosfatados y 0.85 millones de potásicos; de estos, el país importó en promedio 71% de N, 100% de P y 84% de K. Si usáramos como referencia el precio promedio de la urea entre 2009-2013 (341 USD; *The World Bank*, 2015), México gastó alrededor de 1400 millones de USD solo por importar fertilizantes N (280 000 millones de USD anualmente).

Para el caso de fertilizantes N, se señala que la eficiencia de su empleo oscila entre 10% y 60% (Shaviv, 2005) de acuerdo con el tipo de fertilizante, el cultivo y del agrosistema de producción (Cueto-Wong *et al.*, 2013; Chinamuthu & Boopathi, 2009). La baja eficiencia en el uso de fertilizantes N entre los años 2009 a 2013 representó pérdidas entre 560 millones de dólares y 1260 millones de dólares. De cualquier modo, suponiendo que la eficiencia en el uso de N fuera la más alta (60%), por cada punto porcentual que se pueda incrementar la eficiencia de fertilizantes N, en México se ahorrarían 14 millones de USD cada 5 años.

Ante este desalentador panorama se requieren nuevas tecnologías que permitan incrementar el uso eficiente de los fertilizantes y otros insumos. Además, la limitada disponibilidad de agua y suelo obliga a que la agricultura tradicional sea más eficiente y productiva usando tecnologías modernas. Debido al restringido crecimiento y expansión de la tierra arable, así como del uso de agua para riego en todo el mundo, es prioritario trabajar en el desarrollo de la agricultura sustentable y el incremento en el uso eficiente de los agroinsumos, reduciendo o minimizando el daño a los ecosistemas.

En este contexto la NT tiene el potencial de revolucionar los sistemas agrícolas, ya que con ellos se pueden producir nanofertilizantes, nanopesticidas, así como muchos otros agro nanoproductos (Baruah & Dutta, 2009; Liu & Lal, 2015). La NT puede ser utilizada para mejorar formulaciones de fertilizantes amigables con el ambiente. Sin embargo, la NT también puede mejorar la efectividad de los fertilizantes de otras maneras. Por ejemplo, debido a sus características fotocatalíticas, algunas NPs metálicas se han incorporado a fertilizantes como un suplemento con efecto fungicida y bactericida (Ditta, Arshad & Ibrahim, 2015).

Es bien sabido el problema actual de que la superficie total de tierra arable se ha incrementado muy poco y en muchas partes del mundo se ha limitado debido a la urbanización; adicionalmente algunas imágenes satelitales revelan que en nuestro planeta se están reduciendo rápidamente las regiones con tierra fértil y que la producción de alimentos al ritmo actual muy pronto será incapaz de ir al parejo con el crecimiento de la población global (Baruah & Dutta, 2009). Debido a eso, numerosos científicos están considerando a la NT como una importante herramienta para eficientar el uso de fertilizantes y otros insumos de la agricultura no tradicional del siglo XXI (Cicek & Nadaroglu, 2015), así como para elaborar nanopesticidas que sean requeridos en bajas dosis y muestren ser ambientalmente seguros (Zhang *et al.*, 2008).

Los fertilizantes tienen una función muy importante dentro de la agricultura, pero su uso intensivo provoca la salinización de los suelos y para remediarlo se ha optado por emplear alternativas para disminuir este tipo de problemas. Por lo tanto, el suministro de nanofertilizantes al suelo podrá ayudar a tener una rápida captación de los nutrientes del suelo por las plantas, al aumentar la eficiencia del intercambio simbiótico entre los nutrientes del suelo y el sistema radicular de la planta, ayudando así a obtener un mayor rendimiento de los cultivos (Rameshaiah & JPallavi, 2015).

Diversas investigaciones consignan que tanto el efecto nanofertilizante y/o promotor o inhibidor del crecimiento provocado por las NPs está relacionado con su

concentración, tamaño y las propiedades inherentes del elemento involucrado, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta (Albanese, Tang & Chan, 2012; Engates & Shipley, 2011). Los resultados de Dimpka *et al.* (2012) indican que algunas NPs como ZnO y CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA), el cual promueve la elongación y división celular incrementando así la velocidad de crecimiento en las plantas (Zhao *et al.*, 2014); además nanopartículas de Fe₃O₄ han mostrado que activan la biosíntesis de ácido salicílico, aumentando su acción fitoestimulante (Li *et al.*, 2014; Mahdavi, Namvar, Ahmad & Mohamad, 2013).

Se ha demostrado que los nanofertilizantes incrementan el uso eficiente de los nutrientes, reducen su toxicidad en el suelo al aplicarse cantidades muy pequeñas, minimizan el efecto negativo de las sobredosis, bajan la frecuencia de aplicación de los fertilizantes y en consecuencia el costo de estos importantes insumos. Los resultados generados por Amirnia, Bayat & Tajbakhsh (2014) revelan que en un estudio de dos años se encontraron diferencias significativas entre los niveles o dosis estudiadas de nanofertilizantes con base en Fe, P y K, así como en los ecotipos evaluados de azafrán (*Crocus sativus*). Los resultados muestran que los nanofertilizantes conteniendo Fe, P y K tuvieron efectos positivos en la floración de dicho cultivo. Por lo tanto, emplear NPs metálicas de Fe, Zn, Cu, etc., que funcionan como micronutrientes tienen mucho potencial para la agricultura sustentable (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013).

Al estudiar el efecto de NPs ZnO como promotoras de crecimiento en el cultivo de sorgo (*Pennisetum americanum*), Tarafdar, Raliya, Mahawar & Rathore (2014) encontraron un incremento significativo en el crecimiento del tallo (15.1%), longitud de raíz (4.2%), área radicular (24.2%), contenido de clorofila (24.4%), proteína soluble total en hojas (38.7%), biomasa seca de plantas (12.5%), y actividad enzimática de fosfatasa ácida (76.9%), fosfatasa alcalina (61.7%), fitasa (322.2%), y dehidrogenasa (21%). Esos aumentos en variables fisiológicas y bioquímicas se detectaron en plantas de 6 semanas tratadas con NPs ZnO, en comparación con las plantas del tratamiento control o testigo. Además, el rendimiento de grano se incrementó en 37.7% debido a la aplicación de nanofertilizante de zinc.

Por su parte, Raliya, Biswas & Tarafdar (2015) encontraron que NPs de óxido de titanio aplicado foliarmente en dosis de 10 mg L⁻¹ a plantas de *Vigna radiata* puede servir como un fertilizante más amigable con el ambiente, debido a que su aplicación reveló un incremento significativo en la longitud del tallo (17.02%), longitud de raíz (49.6%), área radicular (43%), nódulos radiculares (67.5%), contenido de clorofila (46.4%) y proteína total soluble (94%)

debido a la aplicación de esas NPs. Además, se detectó que en la zona de la rizósfera la población microbiana benéfica se incrementó entre 21.4% y 48.1%, así como la actividad de fosfatasa ácida (67.3%), fosfatasa alcalina (72%), fitasa (64%) y dehidrogenasa (108.7%).

Problemas de toxicidad por el uso de nanopartículas

Las aplicaciones foliares y mediante el sistema de riego de las diversas NPs puede provocar fitotoxicidad, así como afectar el suelo y el agua por su bioacumulación por lo que se debe tener en cuenta cuales son las dosis óptimas y frecuencia de aplicación en los cultivos. Los mecanismos de nanotoxicidad siguen siendo desconocidos, sin embargo, están estrechamente relacionados con la dosis, el nanoproducción, composición, estructura química, tamaño de partícula y su área superficial (Aslani *et al.*, 2014).

La toxicidad de las NPs puede atribuirse a las siguientes dos acciones: (1) Toxicidad química en base a la liberación de iones tóxicos; (2) El estrés o estímulos causados por la superficie, el tamaño y/o forma de las partículas. Se ha confirmado que la solubilidad de las NPs de óxido afecta significativamente la respuesta de las plantas. En los estudios de Zhang *et al.* (2015), se investigó la fitotoxicidad de las NPs de ZnO sobre la germinación de semillas de maíz (*Zea mays* L.) y de pepino (*Cucumis sativus* L.). Respecto a la elongación de la raíz, todas las plántulas fueron afectadas al ser expuestas a una concentración de 1000 mg L⁻¹. Por su lado, las investigaciones de El-Temsah & Joner (2012) determinaron el potencial fitotóxico de las NPs de hierro (Fe), utilizando tres tipos de tamaño de partícula en el rango de 1 nm a 20 nm, sobre la germinación de semillas de las especies cebada y lino.

Thuesombat, Hannongbua, Akasit & Chadchawan (2014) evaluaron los posibles efectos de diferentes NPs de plata con tamaños de 20 nm, 30 nm, 60 nm, 70 nm, 120 nm y 150 nm de diámetro en la germinación de semillas y crecimiento plantas de arroz (*Oryza sativa* L.), usando diferentes concentraciones (0 mg L⁻¹, 1 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹, 100 mg L⁻¹ y 1000 mg L⁻¹). Los resultados revelan que la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas disminuyeron paulatinamente con el aumento en tamaños y concentraciones de NPs. Los resultados del análisis de tejidos demostraron que la mayor concentración de NPs se localizó principalmente en la raíz de semillas tratadas con NPs de 20 nm.

Vías de absorción y traslocación de las nanopartículas en las plantas

En la figura 5 se muestran las diferentes vías o caminos durante la absorción y traslocación de las NPs. Los resultados de Eichert, Kurtz, Steiner & Goldbach (2008) señalan

que la avenida de las NPs por el sistema vascular permite que se transporten a altas velocidades; estos logros científicos soportan la hipótesis de que la penetración de NPs por aperturas estomáticas pueden incrementar la actividad metabólica celular (Lin *et al.*, 2009) logrando así promover el crecimiento y rendimiento de los cultivos de una manera más efectiva que los fertilizantes tradicionales (Siskani, Seghatoleslami & Moosavi, 2015); causando su efecto en diversas respuestas fisiológicas como el desarrollo de raíz, flores y frutos, así como en expresiones bioquímicas relacionadas con la producción de clorofila, licopeno, catalasa, peroxidasa, etc. (Chen, 2014).

Buscando mejorar las formas de penetración y traslocación de diversas NPs en las plantas, Tarafdar, Xion, Wang, Dong & Biswas (2012) encontraron después de ejecutar una serie de experimentos para conocer el tamaño, forma y concentración por aplicar en las plantas, que las NPs menores a 5 nm penetran fácilmente por los estomas de las hojas y que las NPs de hasta 20 nm pueden moverse vía intercelular a través de los plasmodesmos y acuaporinas. Por otra parte, también descubrieron que al aplicar de manera foliar las NPs, se generan pérdidas de hasta 14.7% al usar nebulizador y hasta 32.5% cuando se hacen aplicaciones al sistema radicular.

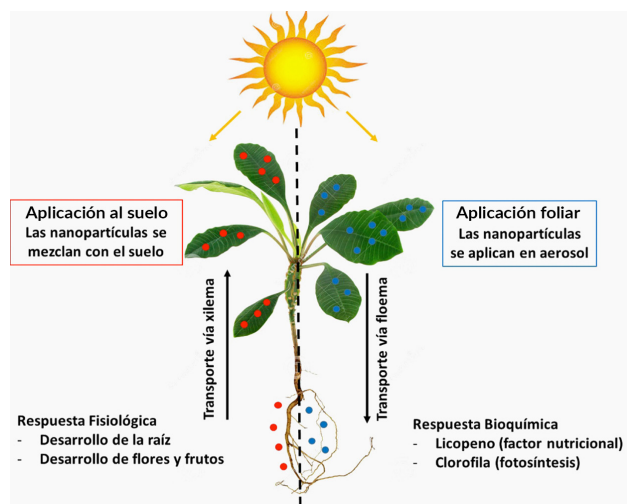


Figura 5

Las nanopartículas pueden aplicarse foliarmente mediante aspersión y en el agua de riego a la zona de las raíces, pudiendo luego transportarse a diversos sitios de las plantas por las rutas del xilema y el floema, donde inducirán múltiples respuestas fisiológicas y bioquímicas. Las NPs inician su recorrido mediante el proceso de absorción y traslocación en la raíz por la ruta del simplasto y apoplasto, en seguida llegan a la corteza y atraviesan la endodermis por el tejido conductivo del xilema; luego continúan su movimiento ascendente en el xilema; cuando las NPs se aplican al follaje el transporte hacia las raíces siguen la vía del floema.

Fuente: Elaboración propia.

En la zona de la rizósfera se ha señalado que se facilita su absorción por la presencia de raíces semipermeables (Prashar, Kapoor & Sachdeva, 2014). El transporte de las NPs en las plantas sigue diversas rutas. Cuando se aplican al suelo se absorben por las raíces y se translocan principalmente por el apoplasto del xilema, tal y como fue demostrado en zacate rye grass (*Lolium perenne*) por Lin & Xing (2008). El movimiento de las NPs depende del tamaño y superficie del tejido vegetal, ya que las hojas y los frutos tienen una epidermis que está cubierta por la cutícula que regulan la entrada de NPs, porque las propiedades permeables de la cutícula, epidermis, tricomas y estomas, dificultan que su penetración sea fácil (Burkhardt, Basi, Pariyar & Hunsche, 2012).

Estrategias modernas sustentables para incrementar el rendimiento de los cultivos agrícolas se orientan a promover tecnologías capaces de suministrar un sistema de acarreo, transporte y entrega de fertilizantes que liberen su carga de manera controlada (lenta o rápida), en función de señales calóricas, humedad, etc., y esto permite optimizar el uso de los agroproductos (Thirunavukkarsu & Subramanian, 2014). Las plantas bajo limitaciones de nutrientes secretan compuestos carbonosos en la rizósfera permitiendo la mineralización biótica de N y/o P desde la materia orgánica, así como del P asociado con los coloides inorgánicos del suelo para que de esta manera se pueda nutrir a la planta de los minerales esenciales para su desarrollo (Naderi & Danesh-Shahraki, 2013), de los cuales algunos son absorbidos, traslocados y transportados por el tejido conductivo vascular (Zhu, Han, Xiao & Jin, 2008).

Reportes sobre el uso de NPs en diferentes cultivos han evidenciado que incrementan la germinación y crecimiento de plántulas, su actividad fisiológica, la expresión de los genes y el nivel bioquímico de proteínas y enzimas en las plantas, indicando eso su potencial para mejorar de manera sustentable el rendimiento de cultivos agrícolas. El trabajo de Azarpour, Asghari, Bozorgi & Kamalpour (2013) señala que las NPsFe aplicadas foliarmente y luego transportadas al interior por los haces vasculares del floema mejoró la producción de flores y rendimiento del azafrán (*Crocus sativus*). El trabajo de Cifuentes *et al.* (2010) dejar ver que las NPs magnéticas recubiertas de carbono forman un fluido magnético biocompatible habiendo podido penetrar fácilmente a través de la raíz en plantas de cuatro tipos diferentes: frijol, girasol, tomate y trigo. Estos autores también determinaron que las NPs alcanzaron el cilindro vascular, se movieron con el flujo de la transpiración y se translocaron a través de la parte aérea de las plantas en menos de 24 h. La acumulación de estas NPs se detectó en los tricomas de las hojas de trigo, lo cual sugiere una forma de excreción para contrarrestar efectos de una posible intoxicación por las NPs aplicadas.

CONCLUSIONES

En el contexto de la agricultura moderna no convencional, el uso de la NT para formular nano insumos ofrece la posibilidad de mejorar el uso y eficiencia de los productos empleados, además de reducir la cantidad aplicada de agroquímicos promoviendo así una agricultura sustentable y de bajo impacto ambiental. Acorde con reciente información publicada en revistas de gran prestigio científico, queda claro que la NT es un campo prometedor de la investigación inter y multidisciplinaria orientada a mejorar la productividad de los agroecosistemas. Con la NT se abre un amplio abanico de oportunidades en diversos campos de la agricultura para la formulación de agroquímicos con productos conteniendo NPs, ya sean metálicas, orgánicas o derivadas del carbono; por lo tanto, los usos y beneficios potenciales de la NT son enormes para fabricar nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, en el contexto de la nueva revolución verde.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo recibido mediante la beca posdoctoral número 230282 de Bulmaro Méndez-Argüello, así como por los recursos aportados mediante el proyecto 268 de la Convocatoria Fronteras de la Ciencia.

REFERENCIAS

- Adhikari, T., Kundu, S., & Rao, A. (2016). Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1), 136-146.
- Afzali, A., & Maghsoodlou, S. (2016). Engineering nanotextiles: Design of textile products. En M. Ciocoiu & S. Maamir (Eds.), *Nanostructured polymer blends and composites in textiles* (pp. 1-40). Apple Academic Press.
- Albanese, A., Tang, P., & Chan, W. (2012). The effect of nanoparticle size, shape, and surface chemistry on biological systems. *Annual review of biomedical engineering*, 14(1), 1-16.
- Alghuthaymi, M., Almoammar, H., Rai, M., Said-Galiev, E., & Abd-Elsalam, K. (2015). Myconanoparticles: synthesis and their role in phytopathogens management. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 29(2), 221-236.
- Amirnia, R., Bayat, M., & Tajbakhsh, M. (2014). Effects of nano fertilizer application and maternal corm weight on flowering at some saffron (*Crocus sativus* L.) ecotypes. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(2), 158-168.
- Aouada, F., & de Moura, M. (2015). Nanotechnology applied in agriculture: Controlled release of agrochemicals. En Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., Duran, N. (Eds.) *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 103-118). Estados Unidos: Springer International Publishing.
- Aslani, F., Bagheri, S., Muhd, N., Shukor, A., Golestan, F., & Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: An Overview. *The Scientific World Journal*, 2014(2014), 28.
- Ayutsede, J., Gandhi, M., Sukigara, S., Ye, H., Hsu, C., Gogotsi, Y., & Ko, F. (2006). Carbon nanotube reinforced Bombyx mori silk nanofibers by the electrospinning process. *Biomacromolecules*, 7(1), 208-214.
- Azarpour, E., Asghari, J., Bozorgi, H., & Kamalpour, G. (2013). Foliar spraying of *Ascophyllum nodosum* extract, methanol and iron fertilizers on fresh flower cover yield of saffron plant (*Crocus sativus* L.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(17), 1854-1862.
- Baruah, S., & Dutta, J. (2009). Nanotechnology applications in pollution sensing and degradation in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 7(3), 191-204.
- Betancourt, R., Reyes, P., Puente, B., Ávila, C., Rodríguez, O., Cadenas, G., Lira, R., & García, L. (2014). Synthesis of copper nanoparticles by thermal decomposition and their antimicrobial properties. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 1-5.
- Bharadwaj, D. (2016). Sustainable agriculture and plant breeding. En Al-Khayri, J., Mohan, S. & Johnson, D. (Eds.) *Advances in plant breeding strategies: agronomic, abiotic and biotic stress traits* (pp. 3-34). Estados Unidos: Springer International Publishing.
- Burkhardt, J., Basi, S., Pariyar, S., & Hunsche, M. (2012). Stomatal penetration by aqueous solutions—an update involving leaf surface particles. *New Phytologist*, 196(3), 774-787.
- Cai, Y., Zhang, H., Song, J., Zhang, Y., Rehman, A., & He, P. (2015). Bottom-up fabrication of graphene on Ru (0001) via molecular self-assembly. *Nanotechnology*, 26(29), 1-12.
- Campos, E., de Oliveira, J., & Fraceto, L. (2014). Applications of controlled release systems for fungicides, herbicides, acaricides, nutrients, and plant growth hormones: a review. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 6(4), 373-387.
- Cañas, J., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., & Olszyk, D. (2008). Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9), 1922-1931.
- Carrillo, J., Meléndez, H., Puente, B., Padrón, G., Ledezma, A., & Betancourt, R. (2016). Composite based on poly (acrylic acid co itaconic acid) hydrogel with antibacterial performance. *Polymer Composites*, 39(1), 171-180.
- Cicek, S., & Nadaroglu, H. (2015). The use of nanotechnology in the agriculture. *Advances in Nano research*, 3(4), 207-223.

- Cifuentes, Z., Custardoy, L., de la Fuente, J., Marquina, C., Ibarra, R., Rubiales, D., & Pérez-de-Luque, A. (2010). Absorption and translocation to the aerial part of magnetic carbon-coated nanoparticles through the root of different crop plants. *Journal of Nanobiotechnology*, 8(1), 1-8.
- Cioffi, N., Torsi, L., Ditaranto, N., Tantillo, G., Ghibelli, L., Sabbatini, L., Bleve-Zacheo, T., D'alesio, M., Zambonin, G., & Traversa, E. (2005). Copper nanoparticle/polymer composites with antifungal and bacteriostatic properties. *Chemistry of Materials*, 17(21), 5255-5262.
- Chakravarty, D., Erande, M., & Late, D. (2015). Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators: effects on coriander and garlic plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(13), 2772-2778.
- Chen, L. (2014). Sweet sugar transporters for phloem transport and pathogen nutrition. *New Phytologist*, 201(4), 1150-1155.
- Cheng, F., Liu, Y., Lu, G., Zhang, X., Xie, L., Yuan, C., & Xu, B. (2016). Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L. and regulates ABA and IAA concentration. *Journal of Plant Physiology*, 193(2016), 57-63.
- Chinnamuthu, C., & Boopathi, P. (2009). Nanotechnology and agro-ecosystem. *The Madras Agricultural Journal*, 96(1-6), 17-31.
- Corredor, E., Testillano, P., Coronado, M., González, P., Fernández, P., Marquina, C., Ibarra, R., de la Fuente, Rubiales, D., Pérez, A., & Riusueño, M. (2009). Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: in situ subcellular identification. *BMC Plant Biology*, 9(1), 1-11.
- Cota, O., Cortez, M., Burgos, A., Ezquerro, J., & Plascencia, M. (2013). Controlled release matrices and micro/nanoparticles of chitosan with antimicrobial potential: development of new strategies for microbial control in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(7), 1525-1536.
- Cueto-Wong, J. A., Reta-Sánchez, D. G., Figueroa-Viramontes, U., Quiroga-Garza, H. M., Ramos-Rodríguez, A., & Peña-Cabiales, J. J. (2013). Recuperación de nitrógeno aplicado en forma fraccionada en maíz forrajero utilizando 15N. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 5(1), 11-16.
- Da Costa, M., & Sharma, P. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 54(1), 110-119.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R., & Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: from field to plate. *Food Research International*, 69, 381-400.
- Ditta, A., Arshad, M., & Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and perspectives. En Siddiqui, M., Al-Whaibi, M. & Mohammad, F. *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 55-75). Estados Unidos: Springer International Publishing.
- Dubey, A., & Mailapalli, D.R. (2016). Nanofertilizers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. En Lichtfouse, E. (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.
- Ebbs, S., Bradfield, S., Kumar, P., White, J., Musante, C., & Ma, X. (2016). Accumulation of zinc, copper, or cerium in carrot (*Daucus carota*) exposed to metal oxide nanoparticles and metal ions. *Environmental Science: Nano*, 3(1), 114-126.
- Echegoyen, Y., & Nerín, C. (2013). Nanoparticle release from nanosilver antimicrobial food containers. *Food and Chemical Toxicology*, 62, 16-22.
- Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U., & Goldbach, H. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum*, 134(1), 151-160.
- El-Temsah, Y., & Joner, E. (2012). Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. *Environmental Toxicology*, 27(1), 42-49.
- Engates, K., & Shipley, H. (2011). Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(3), 386-395.
- Enyashin, A., Gemming, S., & Seifert, G. (2007). DNA-wrapped carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 18(24), 1-10.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). División de Estadística de las Naciones Unidas. Recuperado el de septiembre del 2015 de <http://faostat3.fao.org/compare>
- Fraceto, L., Grillo, R., de Medeiros, G., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in Agriculture: which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*, 4(20), 1-5.
- Fricker, M. & Willmer, C. (2012). *Stomata*. (second ed.). Estados Unidos: Springer Science & Business Media.
- Fried, G., Chauvel, B., Reynaud, P. & Sache, I. (2017). Decreases in crop production by non-native weeds, pests, and pathogens. En Vilà, M. & Hulme, P. *Impact of Biological Invasions on Ecosystem Services* (pp. 83-101). Estados Unidos: Springer International Publishing.
- Ganesh, B., Isloor, A., & Ismail, A. (2013). Enhanced hydrophilicity and salt rejection study of graphene oxide-polysulfone mixed matrix membrane. *Desalination*, 313, 199-207.
- Ghormade, V., Gholap, H., Kale, S., Kulkarni, V., Bhat, S., & Paknikar, K. (2015). Fluorescent cadmium telluride quantum dots embedded chitosan nanoparticles: a stable, biocompatible preparation for bioimaging. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 26(1), 42-56.
- Grillo, R., Rosa, A., & Fraceto, L. (2015). Engineered nanoparticles and organic matter: a review of the state-of-the-art. *Chemosphere*, 119, 608-619.
- Hajipour, M., Fromm, K., Ashkarran, A., de Aberasturi, D., de Larramendi, I., Rojo, T., Serpooshan, V., Wolfgang, P., & Mahmoudi, M. (2012). Antibacterial properties of nanoparticles. *Trends in biotechnology*, 30(10), 499-511.
- Handford, C., Dean, M., Henchion, M., Spence, M., Elliott, C., & Campbell, K. (2014). Implications of nanotechnology for the agri-food industry: Opportunities, benefits and risks. *Trends in Food Science & Technology*, 40(2), 226-241.

- Hawthorne, J., De la Torre Roche, R., Xing, B., Newman, L., Ma, X., Majumdar, S., Gardea-Torresdey, J., & White, J. (2014). Particle-size dependent accumulation and trophic transfer of cerium oxide through a terrestrial food chain. *Environmental science & technology*, 48(22), 13102-13109.
- Hidayat, R., Fadillah, G., Chasanah, U., Wahyuningasih, S., & Ramelan, A. (2015). Effectiveness of urea nanofertilizer based aminopropyltrimethoxysilane (APTMS)-zeolite as slow release fertilizer system. *African Journal of Agricultural Research*, 10(14), 1785-1788.
- Hulla, J., Sahu, S., & Hayes, A. (2015). Nanotechnology History and future. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1318-1321.
- Indrová, K., Prošek, Z., Topič, J., Ryparová, P., Nežerka, V., & Tesárek, P. (2015). Mechanical properties of PVA nanofiber textiles with incorporated nanodiamonds, copper and silver ions. *Acta Polytechnica*, 55(1), 14-21.
- Jalali, M., Ghanati, F., Modarres-Sanavi, A., & Khoshgoftarmanesh, A. (2017). Physiological effects of repeated foliar application of magnetite nanoparticles on maize plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(6), 593-602. doi: 10.1111/jac.12208.
- Jiao, J., Cheng, F., Zhang, X., Xie, L., Li, Z., Yuan, C., & Zhang, L. (2016). Preparation of graphene oxide and its mechanism in promoting tomato roots growth. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(4), 4216-4223.
- Kah, M. (2015). Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation?. *Frontiers in Chemistry*, 3, 1-6.
- Kashyap, P., Xiang, X., & Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 36-51.
- Khodakovskaya, M., de Silva, K., Biris, A., Dervishi, E., & Villagarcia, H. (2012). Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS nano*, 6(3), 2128-2135.
- Khodakovskaya, M., Kim, B., Kim, J., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., & Cernigla, C. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115-123.
- Khot, L., Sankaran, S., Maja, J., Ehsani, R., & Schuster, E. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- Kulkarni, M., Mazare, A., Gongadze, E., Perutkova, Š., Kralj-Iglič, V., Milošev, I., Schmuki, P., & Mozetič, M. (2015). Titanium nanostructures for biomedical applications. *Nanotechnology*, 26(6), 1-19.
- Kumar, R., Yadava, Y., Yadav, A., Singh, K., Mishra, J., Yadav, R. Kumar, S., Sinha, N., & Mohan, M. (2015). Nanotechnology and its future prospective for sustainable agriculture. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 28(2), 101-109.
- Kvitek, L., Vanickova, M., Panacek, A., Soukupova, J., Dittrich, M., Valentova, E., Pucek, R., Bancirova, M., Milde, D., & Zboril, R. (2009). Initial study on the toxicity of silver nanoparticles (NPs) against *Paramecium caudatum*. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4296-4300.
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M., & Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite based nanocomposite: An environment friendly slow release fertilizer. *Micro-porous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183.
- Le Van, N., Ma, C., Shang, J., Rui, Y., Liu, S., & Xing, B. (2016). Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*, 144, 661-670.
- Li, R., Shen, Y., Zhang, X., Ma, M., Chen, B., & Van Beek, T. A. (2014). Efficient purification of ginkgolic acids from Ginkgo biloba leaves by selective adsorption on Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. *Journal of Natural Products*, 77(3), 571-575.
- Lin, D., & Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science & Technology (ACS)*, 42(15), 5580-5585.
- Lin, S., Reppert, J., Hu, Q., Hudson, J., Reid, M., Ratnikova, T., Rao, A., Luo, H., & Ke, P.C. (2009). Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small*, 5(10), 1128-1132.
- Lira, S., Esparza, R., Hernández, S., Vera, R., Moreno, L., Betancourt, G., & García, C. (2015). *Antifungal and antibacterial effect of metallic nanoparticles against plant pathogens*. 5to Seminario Internacional de Nanociencias y Nanotecnologías. La Habana, Cuba.
- Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139.
- Liu, L., Liu, J., Wang, Y., Yan, X., & Sun, D. (2011). Facile synthesis of monodispersed silver nanoparticles on graphene oxide sheets with enhanced antibacterial activity. *New Journal of Chemistry*, 35(7), 1418-1423.
- López-Moreno, M., Avilés, L., Pérez, N., Irizarry, B., Perales, O., Cedeno-Mattei, Y., & Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environment*, 550, 45-52.
- Mahdavi, M., Namvar, F., Ahmad, M., & Mohamad, R. (2013). Green biosynthesis and characterization of magnetic iron oxide (Fe₃O₄) nanoparticles using seaweed (*Sargassum muticum*) aqueous extract. *Molecules*, 18(5), 5954-5964.
- Malsch, I., Subramanian, V., Semenzin, E., Hristozov, D., & Marcomini, A. (2015). Supporting decision-making for sustainable nanotechnology. *Environment Systems and Decisions*, 35(1), 54-75.
- Mehrazar, E., Rahaie, M., & Rahaie, S. (2015). Application of nanoparticles for pesticides, herbicides, fertilizers and animals feed management. *International Journal of Nanoparticles*, 8(1), 1-19.
- Morones, J., Elechiguerra, J., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J., Ramírez, J., & Yacaman, M. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 16(10), 2346-2353.
- Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A., Pagano, L., Dhankher, O., & White, J. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-16.

- Mukherjee, S., Chowdhury, D., Kotcherlakota, R., Patra, S., Bhadra M., Sreedhar B., & Patra C. (2014). Potential theranostics application of bio-synthesized silver nanoparticles (4-in-1 System). *Theranostics*, 4(3), 316-335.
- Naderi, M., & Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(19), 2229-2232.
- Nuruzzaman, M., Rahman, M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: a new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7), 1447-1483.
- Patil, C., Borase, H., Patil, S., Salunkhe, R., & Salunke, B. (2012). Larvicidal activity of silver nanoparticles synthesized using *Pergularia daemia* plant latex against *Aedes aegypti* and *Anopheles stephensi* and nontarget fish *Poecilia reticulata*. *Parasitology Research*, 111(2), 555-562.
- Pérez, A., & Rubiales, D. (2009). Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest Management Science*, 65(5), 540-545.
- Perni, S., Thenault, V., Abdo, P., Margulis, K., Magdassi, S., & Prokopenko, P. (2015). Antimicrobial activity of bone cements embedded with organic nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 10(1), 6317-6329.
- Prashar, P., Kapoor, N., & Sachdeva, S. (2014). Rhizosphere: its structure, bacterial diversity and significance. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(1), 63-77.
- Prabhu, S., & Poulouse, E.K. (2012). Silver nanoparticles: mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects. *International Nano Letters*, 2(1), 1-10.
- Prasad, R., Kumar, V., & Prasad, K. (2014). Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6), 705-713.
- Pukird, S., Chamninok, P., Samran, S., Kasian, P., Noipa, K., & Chow, L. (2017). Synthesis and characterization of SiO₂ nanowires prepared from rice husk ash. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 19(2), 33-37.
- Quintili, M. (2012). Nanociencia y Nanotecnología. Un mundo pequeño. Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. *Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Ensayos*, 42, 125-155.
- Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. (2012). Implications of nanobiosensors in agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3(2A), 315-324.
- Raliya, R., Biswas, P., & Tarafdar, J. (2015). TiO₂ nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). *Biotechnology Reports*, 5, 22-26.
- Rameshaiah, G., & Pallavi, J. (2015). Nano fertilizers and nano sensors—an attempt for developing smart agriculture. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1), 314-320.
- Rauta, P., & Sahoo, N. (2015). *Properties enhancement of refractory bricks by incorporation of nanomaterials*. 2015 International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE).
- Reed, R., Zaikova, T., Barber, A., Simonich, M., Lankone, R., Marco, M., Hristovski, K., Herckes, p., Passantino, L., Fairbrother, D., Ranville, J., Hutchinson, J., & Tanguay, R. (2016). Potential environmental impacts and antimicrobial efficacy of silver- and nanosilver-containing textiles. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 4018-4026.
- Robinson, J., Perkins, F., Snow, E., Wei, Z., & Sheehan, P. (2008). Reduced graphene oxide molecular sensors. *Nano Letters*, 8(10), 3137-3140.
- Robles, F. C., & Cantú, A. M. (2017). Nanoplaguicidas, ¿un verdadero avance para la agricultura?. *Revista Bio Ciencias*, 4(3), 164-178.
- Sairam, K., & Gangurde, N. (2016). Nanonutrients with lacto-gluconates based nutritional biofertilizer's for sustainable agriculture. En Sayyed, R., Reddy, m. & Al-Turky, A. (Eds.) *Recent Trends in PGPR Research for Sustainable Crop Productivity*. (pp. 112-1129). India: Scientific, Publishers.
- Sarлак, N., Taherifar, A., & Salehi, F. (2014). Synthesis of nanopesticides by encapsulating pesticide nanoparticles using functionalized carbon nanotubes and application of new nanocomposite for plant disease treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(21), 4833-4838.
- Saxena, M., Maity, S., & Sarkar, S. (2014). Carbon nanoparticles in 'bio-char' boost wheat (*Triticum aestivum*) plant growth. *RSC Advances*, 4(75), 39948-39954.
- Serag, M., Kaji, N., Gaillard, C., Okamoto, Y., Terasaka, K., Jabasini, M., Manabu, T., Mizukami, H., Bianco, A., & Baba, Y. (2011). Trafficking and subcellular localization of multiwalled carbon nanotubes in plant cells. *ACS nano*, 5(1), 493-499.
- Shang, Q., Feng, S., & Zheng, H. T. (2006). Preparation of abamectin-nanocapsules suspension concentrate. *Agrochemicals*, 2006(12), 831-841. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NYZZ200612013.htm
- Shaviv, A. (2005). *Controlled release fertilizers*. Frankfurt, Germany: IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency.
- Shende, S., Ingle, A., Gade, A. & Rai, M. (2015). Green synthesis of copper nanoparticles by *Citrus medica* Linn. (Idilimbu) juice and its antimicrobial activity. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(6), 865-873.
- Shiva, V. (2016). *The violence of the green revolution: Third world agriculture, ecology, and politics*. Lexington, KY: University Press of Kentucky.
- Singh, A., Lal, M., Singh, S., Khan, A., Singh, S., & Tiwari, A. (2015). Scope of nanotechnology in future agriculture-an overview. *Agrica*, 3(2), 1-13.
- Siskani, A., Seghatoleslami, M., & Moosavi, G. (2015). Effect of deficit irrigation on yield and some morphological traits of cotton. *Biological Forum*, 7(1), 1710-1715.

- Smith, T., & Lyshevski, S. (2016). *Nanotechnology for portable energy systems: Modular photovoltaics, energy storage and electronics*. 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 323-326.
- Subramanian, K., Muniraj, I., & Uthandi, S. (2016). Role of actinomyce- te-mediated nanosystem in agriculture. En 105 Subramanian, K., Muniraj, I. & Uthandi, S. (Eds.), *Growth Promoting Actinobacteria* (pp. 233-247). Singapore: Springer.
- Subramanian, V., Semenzin, E., Hristozov, D., Zondervan, E., Linkov, I., & Marcomini, A. (2015). Review of decision analytic tools for sustain- able nanotechnology. *Environment Systems and Decisions*, 35(1), 29-41.
- Sun, C., Shu, K., Wang, W., Ye, Z., Liu, T., Gao, Y., Zheng, H., He, G., & Yin, Y. (2014). Encapsulation and controlled release of hydrophilic pesti- cide in shell cross-linked nanocapsules containing aqueous core. *International Journal of Pharmaceutics*, 463(1), 108-114.
- Tarafdar, J., Raliya, R., Mahawar, H., & Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3(3), 257-262.
- Tarafdar, J., Xiong, Y., Wang, W., Dong, Q., & Biswas, P. (2012). Standar- dization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application. *Applied Biological Research*, 14(2), 138-144.
- Thirunavukkarasu, M., & Subramanian, K.S. (2014). Surface Modified Nano-Zeolite Based Sulphur Fertilizer on Growth and Biochemi- cal Parameters of Groundnut. *Trends in Biosciences*, 7(7), 565-568.
- Thuesombat, P., Hannongbua, S., Akasit, S. & Chadchawan, S. (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Ecotoxicology and Environ- mental Safety*, 104, 302-309.
- Tomlinson, I. (2013). Doubling food production to feed the 9 billion: a critical perspective on a key discourse of food security in the UK. *Journal of Rural Studies*, 29, 81-90.
- Torney, F., Trewyn, B., Lin, V., & Wang, K. (2007). Mesoporous silica na- noparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanote- chnology*, 2(5), 295-300.
- Villagarcia, H., Dervishi, E., de Silva, K., Biris, A., & Khodakovskaya, M. (2012). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small*, 8(15), 2328-2334.
- Wang, W. N., Tarafdar, J. C., & Biswas, P. (2013). Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar up- take. *Journal of Nanoparticle Research*, 15(1), 1-13.
- Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., Liu, X., Feng, W., White, J., & Xing, B. (2012). Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in mai- ze (*Zea mays* L.). *Environmental Science & Technology*, 46(8), 4434-4441.
- Weiss, B., Schaefer, U., Zapp, J., Lamprecht, A., Stallmach, A., & Lehr, C. (2006). Nanoparticles made of fluorescence-labelled poly (L- lactide-co-glycolide): preparation, stability, and biocompatibility. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(9-10), 3048-3056.
- World Bank. (2015). Recuperado el 20 de junio de 2016 de: <http://www.worldbank.org/en/publication/wdr2015>
- Yadav, A. S., & Srivastava, D. S. (2015). Application of nano-technology in weed management: A Review. *Research & Reviews: Journal of Crop Science and Technology*, 4(2), 21-23.
- Zhang, R., Zhang, H., Tu, C., Hu, X., Li, L., Luo, Y., & Christie, P. (2015). Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn (II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during ger- mination. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14), 11109-11117.
- Zhang, X., Su, H., Zhao, Y., & Tan, T. (2008). Antimicrobial activities of hydrophilic polyurethane/titanium dioxide complex film under vi- sible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 199(2-3), 123-129.
- Zhao, Q., Wu, Y., Gao, L., Ma, J., Li, C., & Xiang, C. (2014). Sulfur nutrient availability regulates root elongation by affecting root indole- 3-acetic acid levels and the stem cell niche. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(12), 1151-1163.
- Zhu, H., Han, J., Xiao, J., & Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and ac- cumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(6), 713-717.