

## Potencial de la Nanotecnología Para el Desarrollo de la Agricultura Sustentable

<sup>1</sup>Ricardo Hugo Lira-Saldivar, <sup>1</sup>Bulmaro Méndez-Argüello, <sup>2</sup>Ileana Vera-Reyes, <sup>3</sup>Gladys de los Santos-Villarreal

<sup>1</sup>Departamento de Plásticos en la Agricultura; <sup>2</sup>Departamento de Plásticos en la Agricultura Cátedras CONACYT-CIQA; <sup>3</sup>Departamento de Síntesis de Polímeros.

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25294.

### Resumen

La nanotecnología (NT) estudia los materiales que están dentro de la escala atómica y molecular (1-100 nm), los más estudiados son las nanopartículas metálicas (NPs) y las derivadas del carbón. En la agricultura moderna han comenzado a investigarse esos nanomateriales, porque ofrecen incrementar la producción de alimentos. La NT brinda la posibilidad de generar nanofertilizantes y promotores del crecimiento. No obstante, actualmente existen imprecisiones sobre los resultados obtenidos, por una parte, algunas investigaciones muestran que la aplicación de los nanotubos de carbón y las NPs metálicas tienen un efecto benéfico en el crecimiento de las plantas, mientras que otros trabajos reportan inhibición y fitotoxicidad. Estos nanomateriales están aún investigándose, sin embargo, su aplicación ha ido en aumento, y se prevé que siga creciendo en el futuro. Actualmente, la demanda de alimentos básicos a nivel mundial está aumentando, pero las investigaciones y productos para incrementar el rendimiento de los cultivos son insuficientes. Por lo tanto, una opción para el desarrollo de una agricultura sustentable pudiese ser la generación de nanoprodutos. Debido a lo antes señalado, este artículo presenta recientes investigaciones relacionadas con la utilización de las nanopartículas en la agricultura y sus usos potenciales como nanofertilizantes y promotores de crecimiento de las plantas.

**Palabras clave:** Agricultura sustentable, nanotecnología, nanopartículas.

## Introducción

En un intervalo de tiempo relativamente corto, la nanotecnología ha tenido un impacto significativo en numerosos sectores incluyendo la agroindustria. La NT, considerada como una tecnología emergente, se orienta a la caracterización, elaboración y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm), o sea de 1 a 100 billonésimas de metro (Yadollahi, et al., 2009), por lo que se ubica dentro de la escala atómica y molecular. La NT es un extenso campo de la investigación interdisciplinaria, ya que con ella se abre un amplio abanico de oportunidades en diversas áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sustentable (Prasad, et al., 2014). Actualmente los científicos agrícolas se enfrentan a una amplia gama de desafíos como el estancamiento en el rendimientos de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de nutrientes, la disminución de la materia orgánica del suelo, las deficiencias de múltiples nutrientes, el cambio climático, la disminución de la superficie agrícola, la baja disponibilidad de agua para riego y la escasez de mano de obra; además del éxodo de personas desde las áreas agrícolas a las ciudades (Dubey y Mailapalli, 2016).

A pesar de esas enormes dificultades que enfrenta el sector agrícola, es necesario mantener un crecimiento sostenido del 4% para afrontar los desafíos que representa la demanda de alimentos a nivel global (Manimaran, 2015). Por lo tanto, para hacer frente a esa diversidad de problemas, es necesario explorar una de las tecnologías de vanguardia como la NT, misma que permite detectar la presencia de plagas y enfermedades, contaminación de alimentos y aplicar la cantidad correcta de nutrientes y pesticidas que promuevan la productividad, al mismo tiempo que garanticen la seguridad del medio ambiente y una mayor eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Nuruzzaman, et al., 2016). En este contexto, se han desarrollado nuevos nanomateriales basados en el uso de NPs metálicas, poliméricas, inorgánicas, etc., que permitan aumentar la productividad y que busquen encontrar aplicaciones para el perfeccionamiento de nanosistemas inteligentes para

la captura e inmovilización de nutrientes y su gradual liberación en el suelo (Kottegoda, et al., 2011).

Esos sistemas tienen la ventaja de reducir al mínimo la lixiviación, al tiempo que mejoran la absorción de nutrientes por las plantas y coadyuvan a mitigar la eutrofización al reducir la transferencia de nitrógeno a los mantos acuíferos subterráneos (Liu y Lal, 2015). Además, es importante mencionar que los nanomateriales también podrían ser explotados para mejorar la estructura y función de los plaguicidas mediante el aumento de la solubilidad, la resistencia contra la hidrólisis, mejorando su foto descomposición y/o proporcionando una manera más eficaz de liberación controlada hacia los organismos objetivo (Mishra, y Singh, 2015). Por la importancia y posibles beneficios de esta nueva área del conocimiento, en este artículo se presentan recientes investigaciones relacionadas con la utilización de las NPs en la agricultura y sus usos potenciales como nanofertilizantes, promotores de crecimiento de las plantas, nanoplaguicidas y nanosensores.

### **Impulso de la Investigación Nanotecnológica Orientada a la Agricultura y Alimentos**

En años recientes muchos esfuerzos se han venido realizando en centros de investigación e instituciones de educación superior de todo el mundo, para impulsar la investigación sobre NT con la finalidad de encontrar novedosas aplicaciones de esta emergente ciencia en la producción sustentable de alimentos y cultivos (Ditta, et al., 2015; Kashyap, et al., 2015). En este contexto, la bioencapsulación de agroquímicos y microorganismos benéficos ha adquirido una gran relevancia porque es una manera de controlar plagas y enfermedades con bajo impacto ambiental, lo cual permite reducir la cantidad de agroquímicos que dañen los ecosistemas (Grillo, et al., 2016). Es por eso que las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento, debido a que sus beneficios potenciales se enfocan a mejorar la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas al ser utilizados en menor volumen y promoviendo mejoras en la nutrición (Razzaq, et al., 2016).

Mientras que la mayor inversión en NT se realiza en países desarrollados, los avances de investigación permiten vislumbrar posibles aplicaciones en la agricultura, alimentos y en la bioseguridad del agua, lo que podría tener un impacto significativo en la sociedad de países en desarrollo (Gruère, 2012). La observación antes mencionada se centra en las estrategias modernas utilizadas para el manejo del agua, el uso de pesticidas químicos convencionales y el potencial de los nanomateriales en la agricultura sustentable, con un enfoque moderno en las nuevas fronteras de la agricultura no tradicional (Ali, et al., 2014; Singh, et al., 2015).

A pesar de que las posibles aplicaciones de la NT son muy vastas, los usos actuales en el sector agrícola y alimentario son relativamente escasos, debido a que la agronociencia se encuentra en un estado emergente (Siddiqui, et al., 2015). Una visión general de más de 800 productos de consumo basados en NT que actualmente están disponibles a nivel mundial, apunta que sólo cerca del 10 % de ellos son alimentos, bebidas y productos para el envasado de comestibles (Dudo, et al., 2010). Sin embargo, los productos y aplicaciones derivados de la NT en estos sectores han ido en constante aumento en los últimos años, y se prevé que siga creciendo rápidamente en el futuro (Ranjan, et al., 2014).

Todas esas aplicaciones potenciales que han sido generadas por trabajos de investigación, se ven claramente reflejadas en las publicaciones sobre NT que han ido en constante aumento (Figura 1), manifestándose notoriamente en el incremento exponencial anual de las publicaciones científicas relacionadas con el uso de la NT en el sector agrícola y de productos alimenticios. Esa tendencia se ha visto incrementada año con año, en las diversas revistas científicas que exponen los resultados generados no solo en aspectos relacionados con electrónica, mecánica, medicina, sino también en el sector biológico, y en especial lo relativo al efecto de los nanomateriales en diversos aspectos fisiológicos y bioquímicos de plantas cultivadas.

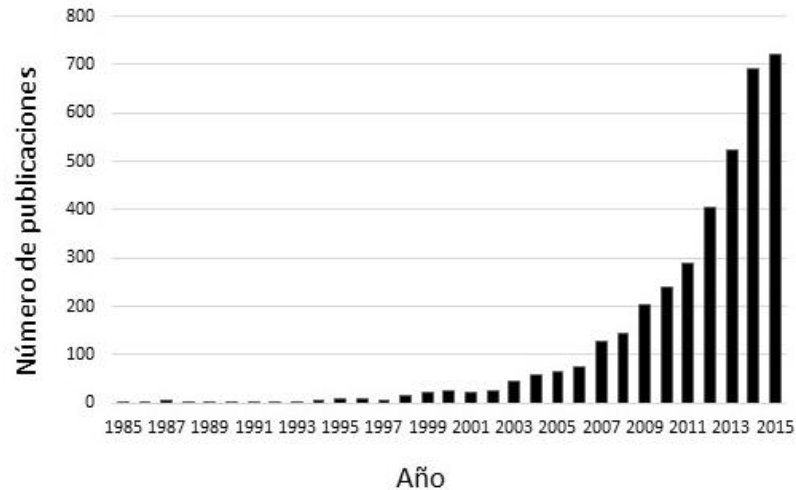


Figura 1. Publicaciones anuales en revistas científicas relacionadas con nanotecnología aplicada a la agricultura y en productos alimenticios.

### Aplicaciones de la Nanotecnología en el Sector Agro Alimentario

El potencial de la NT para revolucionar el cuidado de la salud, como en la producción de textiles antimicrobiales, o su uso en la fabricación de nuevos materiales con propiedades superiores a los ya existentes, su empleo en tecnologías de información, comunicación, así como en el sector energético y en la aeronáutica, ha sido documentado en la literatura, sin embargo, la aplicación de la NT en la agricultura apenas ha comenzado a investigarse.

Los diversos usos potenciales de la NT en la agricultura han creado un gran interés, ya que ofrecen la posibilidad de mejorar la producción agrícola mediante diversas estrategias que pueden incrementar la producción de alimentos utilizando menores insumos de energía y reduciendo los costos de producción y los desperdicios de agroquímicos (Servin y White, 2016). Las aplicaciones de la NT en la agricultura son muy diversas, destacando principalmente la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada (Grillo, et al., 2016), para la producción de nano, macro y micronutrientes, así como para hacer más eficiente el uso y aplicaciones de los agroquímicos (Nuruzzaman, et al., 2016).

En la Figura 2 se presenta un diagrama que ilustra el uso potencial de la NT para diseñar y fabricar nanosensores que permiten detectar la presencia de plagas y enfermedades de cultivos (Fraceto, et al., 2016). Asimismo la NT ha permitido el desarrollo de empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacterial o fúngico al estar envasados (Vanderroost, et al., 2014). La figura también muestra que diversos tipos de NPs metálicas como las de Ag, Fe, Cu, Zn, etc., pueden ser utilizadas con un enfoque dual, ya sea como nanofertilizantes al promover el crecimiento de las plantas (Jeyasubramanian, et al., 2016), o como nanopesticidas (Le Van, et al., 2016). Algunos materiales como arcillas y zeolitas pueden ser empleados al nivel nano para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, y además actúan como materiales de lenta liberación de agua y fertilizantes, incrementando así la eficiencia en el uso de este recurso hídrico y de los nutrientes por las plantas (Sekhon, 2014).

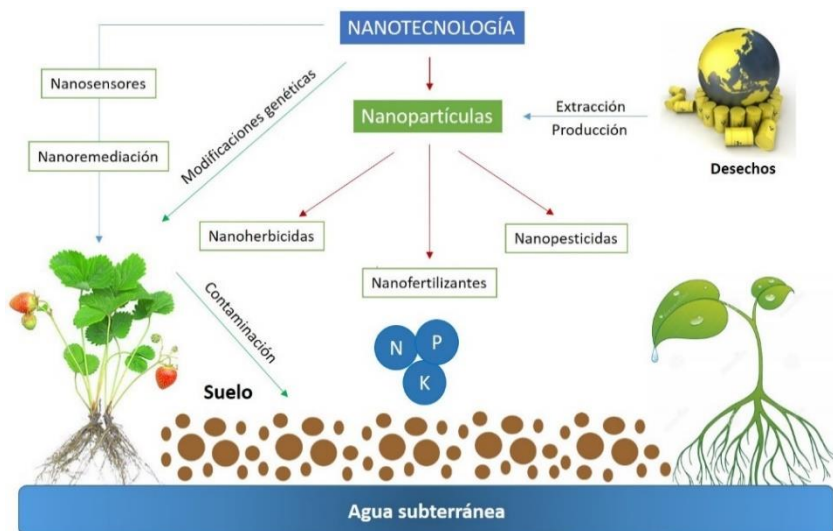


Figura 2. Aplicaciones potenciales de la nanotecnología y de las nanopartículas en la agricultura, incluyendo la fabricación de nanosensores, nanofertilizantes, nanopesticidas y nanoherbicidas.

### Nano Compuestos Empleados en Cultivos Agrícolas y la Agroindustria

Diversos nanomateriales se han venido utilizando e investigando por su función biológica en células de humanos y plantas, como nanotubos de carbono (NTC), fullerenos,

liposomas, proteínas y polímeros (Figura 3), incluyendo biopolímeros como el quitosán (Grillo, et al., 2014).

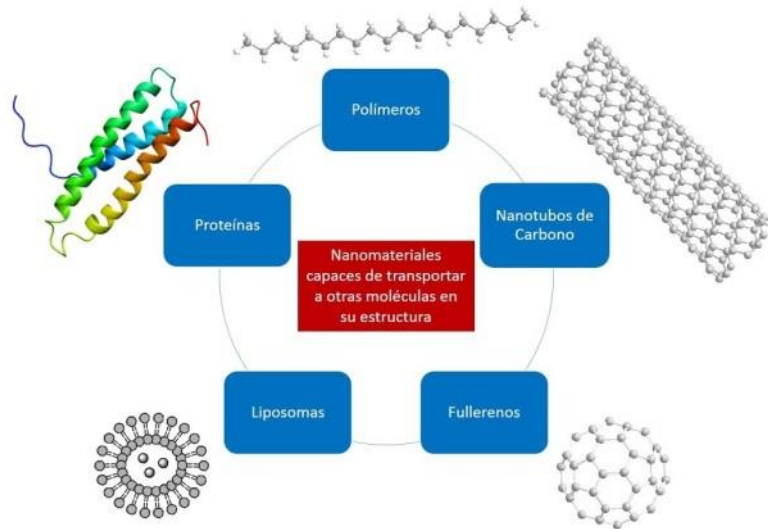


Figura 3. Algunas características de los nanomateriales usados en una gran diversidad de aplicaciones biológicas e industriales.

Los efectos positivos de los NTC en el crecimiento y desarrollo de las plantas han sido descritos por varios grupos de investigación, habiendo reportado que incrementaron el crecimiento de las raíces en plantas de cebolla y pepino (Cañas, et al., 2008), así como de zacate rye grass (Lin y Xing, 2007). También se ha demostrado que los nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCM) pueden activar el crecimiento de plantas de tomate y afectar a la expresión de genes que son esenciales para la división celular y el desarrollo de la planta (Khodakovskaya, et al., 2011; Villagarcía, et al., 2012).

Liu et al., (2009) demostraron que los nanotubos de carbón de pared sencilla poseen el tamaño adecuado como para penetrar en las paredes y membranas de las células de tabaco, esta capacidad de las NPs de penetrar en las células de plantas ha generado interés, porque de manera similar a las aquaporinas pueden ayudar a transportar muy rápidamente agua y nutrientes dentro de las plantas (Joseph y Aluru, 2008). También son útiles para procesos de desalinización, ya que pueden cargarse internamente con iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  para luego eliminar del sistema las sales en exceso (Goh, et al., 2013).

Por su parte los fullerenos al tener una nanoestructura en forma de esfera o balón, pueden utilizarse como contenedores de material biológico o mineral de tal manera que pueda ser transportado hasta su destino en el interior de su estructura, donde luego será utilizado por las plantas (Husen y Siddiqi, 2014). Los organelos celulares conocidos como liposomas también han probado ser útiles para almacenar nitratos en su interior y ser transportados dentro de plantas de *Arabidopsis thaliana* (Parker y Newstead, 2014).

Para el caso de la horticultura, se están utilizando nanomateriales para el tratamiento de algunas enfermedades de plantas, para la detección precoz de los patógenos que las producen (Krishnaraj, et al., 2016), para la mejora de la asimilación de nutrientes esenciales (Martínez, et al., 2016), e incluso para construir nanobiosensores importantes en determinados procesos biológicos (Vimala, et al., 2016). La NT puede incrementar la eficacia de los pesticidas e insecticidas comerciales, reduciendo la cantidad de aplicación al suelo o follaje a dosis significativamente menores que las requeridas convencionalmente, con la mejora que eso implica para los ecosistemas (Xue, et al., 2014).

### **Nanopartículas Empleadas Como Nanofertilizantes y Promotores de Crecimiento Vegetal**

La nutrición mineral de las plantas en la agricultura es de primordial importancia, y en este ámbito los nanofertilizantes ya están ofreciéndose en el mercado de Estado Unidos; por ejemplo, la compañía A.M. Leonard, puso a la venta el producto denominado Florikan, el cual se ha llamado NANO 16-5-11. La empresa que lo produce señala que al utilizar NANO, se obtendrá 10 veces el número puntos de contacto comparado con el fertilizante estándar. NANO se ha formulado al 100 % como nanoencapsulado fertilizante de lenta liberación, teniendo el total de nutrientes solubles en agua para el consumo de las planta; es elaborado con nitrato de amonio y está completamente libre de urea. Se considera que este producto es seguro de usarse, eficaz y económico con una reducción del volumen de fertilización total (A.M-Leonard Company, 2016).



En el ámbito agrícola la producción mundial de alimentos ha sido facilitada por las más diversas tecnologías de producción. Uno de los principales factores para el aumento de producción y disminución de costos, es el aprovechamiento máximo y selección especial de las "mejores" semillas, desarrolladas biotecnológicamente y mediante técnicas genéticas (Shyla y Natarajan, 2014). Por otro lado, respecto al uso de NPs en el área de los fertilizantes químicos o tradicionales, en China se ha reportado la preparación de nanocompuestos conteniendo fertilizantes de liberación lenta, lo cual es un importante avance en la nutrición vegetal (Liu, et al., 2016). Actualmente los nanodispositivos se consideran que tendrán la capacidad de detectar una infección, la deficiencia de nutrientes en las plantas, o cualquier otro problema de fitosanidad, mucho antes de que los síntomas sean evidentes en la escala macro (Scott y Chen, 2013). Este tipo de tratamiento puede ser dirigido a la zona afectada con una mayor conciencia sobre los riesgos asociados con el uso de plaguicidas sintéticos o tradicionales.

Debido al efecto adverso en los agroecosistemas, se ha originado una necesidad urgente de explorar productos alternativos para el control de plagas y enfermedades (Rai y Ingle, 2012). El trabajo de Pérez-de-Luque y Rubiales (2009) pone de manifiesto que la NT está abriendo nuevas aplicaciones potenciales para la agricultura, las cuales ya están siendo exploradas y utilizadas en la medicina y farmacología, pero el interés por su uso en la protección de cultivos apenas está empezando. En el trabajo de esos autores se discute el desarrollo de nanodispositivos para atacar sitios de las plantas con problemas y para usar nanotransportadores de emisiones químicas controladas.

La NT también puede mejorar las técnicas del manejo de cultivos existentes en el corto y mediano plazo. Las nanocápsulas ayudarán a evitar problemas en los cultivos mediante la utilización de herbicidas sistémicos contra malezas parásitas (Yin, et al., 2012). La nanoencapsulación puede mejorar la aplicación de herbicidas, proporcionando una mejor penetración a través de cutículas y tejidos, ya que permite la liberación lenta y constante de las sustancias activas.

Con la nanobiotecnología ya se plantea la posibilidad de diseñar plantas mediante la manipulación de las semillas (Amemiya, et al., 2005). Las investigaciones en este campo se basan en el desarrollo de nuevas técnicas que utilizan NPs que les permiten introducir ADN ajeno a una célula. Por ejemplo, los investigadores del laboratorio Oak Ridge en Estados Unidos, descubrieron una técnica de escala nanométrica para simultáneamente inyectar ADN a millones de células. Con esto se ha logrado que millones de nanofibras de carbono con ADN sintético adherido crezcan de un chip de silicio. Posteriormente se lanzan las células vivas contra las fibras que las perforan y les inyectan ADN en el proceso (Peng, et al., 2015).

La conversión directa de la energía solar a electricidad a partir de las proteínas responsables de la fotosíntesis en las hojas de las plantas, es otro ejemplo de una nueva aplicación de las NPs en la agricultura, tal y como lo han demostrado investigadores de la Universidad Vanderbilt. Por su parte Scott y Chen (Scott, y Chen, 2013) señalan que los cultivos agrícolas no solo pueden incrementar el rendimiento por el uso de la NT, sino que también los nuevos materiales y dispositivos de diseño pueden prevenir la presencia de plagas y enfermedades. De hecho, se prevé un gran futuro a través de la exploración y explotación de los estudios a nanoescala de materiales biológicos de origen agrícola y natural en beneficio de una sociedad sustentable (Fauce, et al., 2013; Panpatte, et al., 2016).

Considerando la limitación de las tierras cultivables y los recursos hídricos, el desarrollo de la agricultura sustentable sólo es posible mediante el aumento de la eficiencia en el uso los recursos, pero causando el mínimo daños a los agroecosistemas mediante el uso eficaz de las tecnologías modernas. Entre estos, la NT tiene el potencial de revolucionar los sistemas agrícolas, la biomedicina, la ingeniería del medio ambiente, la seguridad alimentaria, y la conversión de energía, así como muchas otras áreas (Naderi y Shahraki, 2013). La formulación de productos nanos estructurados que permitan la liberación lenta o controlada, podría liberar con mayor precisión sus ingredientes activos en respuesta a factores ambientales y demandas biológicas. Los estudios muestran que el uso de nano fertilizantes

causa un aumento en la eficiencia de uso de nutrientes, reduce la toxicidad del suelo, así como los potenciales efectos negativos asociados con la dosificación excesiva y reduce la frecuencia de las aplicaciones. Por lo tanto, la NT tiene un alto potencial para lograr una agricultura sustentable, especialmente en los países en desarrollo.

### **Efecto de Algunas Nanopartículas en el Crecimiento de las Plantas**

Algunos autores mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las NPs en las plantas 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, y si actúa como micronutriente tratándose de cobre, zinc, etc. (Wang, et al., 2015). Algunas NPs como las de CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA), así como del ácido salicílico, esto hace que se facilite o incremente la acción fitoestimulante de las NPs (Wang, et al., 2015).

Las NPs de óxido de zinc (NPsZnO) son usadas en diferentes áreas como la industria de cosméticos, textiles, medicina, electricidad y en la agricultura (Chang, et al., 2012). En el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobial (Fang, et al., 2013; Sabir, et al., 2014) y por su potencial como nanofertilizantes, corrigiendo las deficiencias de zinc en las plantas y promoviendo crecimiento y desarrollo (Naderi y Shahraki, 2013; Raskar y Laware, 2014; Dimkpa, et al., 2015). Algunos estudios señalan que concentraciones elevadas ( $1000 \text{ mg L}^{-1}$ ) causan fitotoxicidad e inhibición de la germinación (Kyung-Seok y Kong, 2014; Zhang, et al., 2015); mientras que dosis bajas ( $< 50 \text{ mg L}^{-1}$ ) han demostrado efectos significativos en el crecimiento y desarrollo (Prasad, et al., 2012), reflejándose en una mayor biomasa seca y área foliar. Este efecto promotor ha sido atribuido al zinc, por ser éste uno de los micronutrientes esenciales demandados para la división celular y por su importancia como componente de varias enzimas (Pandey, et al., 2010); también está implicado en la síntesis de proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos (Tarafdar, et al., 2014).

Trabajos efectuados en diversas especies de plantas confirman que las NPsZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui, et al., 2015). En el reporte de Panwar et al. (2012) se señala un mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plántulas de tomate cuando aplicaron  $20 \text{ mg L}^{-1}$  al follaje; además, encontraron altas concentraciones de Zn en las hojas, confirmando con ello que ocurrió la penetración en los estomas y su traslocación basipétala vía floema. Otro estudio realizado por Prasad et al. (2012), indica que en semillas de cacahuate una concentración de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  de NPsZnO promueven la germinación, así como la elongación de raíz y tallo. Zhao et al. (2014) con plantas de pepino cultivadas en maceta, obtuvieron incrementos significativos en longitud y biomasa seca de la raíz con la incorporación al suelo de  $400$  y  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  de NPsZnO, estos investigadores consignan que concentraciones elevadas no afectaron negativamente a las plantas.

En pruebas de germinación las NPsZnO en dosis de  $250$  a  $2000 \text{ mg L}^{-1}$ , promovieron incrementos significativos de clorofila y proteína en plántulas de trigo (Raliya y Tarafdar, 2013). Concentraciones bajas ( $10$  y  $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) de estas mismas NPs mejoraron la germinación de semillas de cebolla (Ramesh, et al., 2014). En plantas de goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) una concentración de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de NPsZnO aplicada foliarmente promovió mayor producción de biomasa, contenido de clorofila, longitud y área radicular, así como la síntesis de proteína (Raliya y Tarafdar, 2013). En plantas de soya la dosis de  $1,0 \text{ g L}^{-1}$  de NPsZnO promovió efectos significativos en la germinación y crecimiento (Sedghi, et al., 2013).

La aplicación foliar de  $1,5$  y  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de NPsZnO durante  $15$  días en plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*), promovieron mayor altura y biomasa seca. Se ha destacado que la aplicación de zinc en forma de nanofertilizante aplicado al follaje en bajas dosis es más eficiente para promover el crecimiento de las plantas, se ha sugerido que esto se debe a que el zinc es requerido para la producción de biomasa y también porque este microelemento tiene una función muy importante en muchas enzimas involucradas en el proceso

fotosintético, así como en la integridad y mantenimiento de las membranas celulares de las plantas (Burman, et al., 2013). El zinc como nanofertilizante en dosis de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  ha promovido mayor crecimiento en plantas de mijo (*Pennisetum americanum*), mayor producción de biomasa seca, longitud de raíz, contenido de clorofila y rendimiento de grano (Tarafdar, et al., 2014). La aplicación foliar de nanoquelato de zinc como fertilizante promovió un incremento significativo en la altura de plantas de algodón (*Gossipium hirsutum*), así como de biomasa seca y contenido de clorofila (Rezaei y Abbasi, 2014).

Existen reportes indicando que las NPsZnO incrementan el nivel de AIA en raíces y en los brotes apicales, promoviendo de esta forma la velocidad de crecimiento en las plantas (Shyla, y Natarajan, 2014). El efecto de las NPsZnO en el crecimiento de las plantas, podría relacionarse a la actividad que tiene el zinc como precursor en la producción de auxinas reguladoras del crecimiento, las cuales también promueven la elongación y división celular (Rehman, et al., 2012). Además, se reporta que el zinc es uno de los nutrientes esenciales y un componente muy importante de varias enzimas responsables de muchas reacciones metabólicas (Shyla y Natarajan, 2014), también desempeña una importante función en la elaboración de clorofila; germinación de semillas; producción de polen y biomasa (Pandey, et al., 2010).

Por otra parte, ha sido puntualizado que las nanopartículas de plata (NPsAg) en concentraciones bajas poseen un efecto positivo en la germinación de semillas y en la promoción del crecimiento en plantas. Sharma et al. (2012), reportan que las NPsAg promueven el crecimiento de plántulas de mostaza (*Brassica juncea*) en concentraciones de  $25$  y  $50 \text{ mg L}^{-1}$ , reflejándose en mayor longitud de raíz, biomasa seca y altura. Sin embargo, altas concentraciones ( $250\text{-}500 \text{ mg kg}^{-1}$  de suelo), inhibieron la germinación y crecimiento de las plantas de haba. Estos incrementos podrían estar relacionados con la producción endógena de fitohormonas como citoquininas y giberelinas, las cuales están implicadas en la división y elongación celular, respectivamente. Además estas NPs pueden mejorar la

eficiencia de intercambio de electrones a nivel celular en las plantas, lo que podría reducir la formación de las dañinas especies reactivas de oxígeno (Dimkpa, et al., 2015).

Otras NPs como las de  $TiO_2$  aplicadas al follaje, muestran un incremento en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción del nitrato, el cual acelera la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico haciéndolo más asimilable, reflejándose esto en mayor crecimiento vegetal (Capaldi, et al., 2015). Estudios realizados por García et al. (2011) revelan que las NPs de cerio son extremadamente tóxicas en el conjunto de ensayos realizados, habiendo determinado que en pruebas de germinación de algunas semillas se mostró un efecto perjudicial (fitotoxicidad) en la germinación. Reportes previos muestran que la fitotoxicidad causada por algunas NPs genera un comportamiento impredecible e irregular sobre el estrés oxidativo, que a su vez depende del tipo, concentración, propiedades y medios de exposición de las NPs (Lei, et al., 2008; Foltete, et al., 2011; Song, et al., 2012). Por lo tanto, la función de las NPs en la modulación del sistema de defensa antioxidante en las plantas no está totalmente elucidado, siendo un tema necesario para ser investigado con profundidad.

Estos resultados pueden servir de base para considerar el uso de NPs magnéticas como un sistema acarreador de drogas para remediar enfermedades bacterianas. Por otro lado, Zhu et al. (2008) han mencionado que las plantas de calabaza (*Cucurbita maxima*), al aplicarles NPs de magnetita ( $Fe_3O_4$ ), pueden absorber, traslocar y acumular las NPs en el tejido vegetal. Eso pone de manifiesto que las plantas son un importante componente del medio ambiente y de los hábitats, por lo tanto, se deben de considerar e investigar cuando se está evaluando el destino, transporte y caminos que siguen las NPs en los ecosistemas.

### **Modo de Absorción y Translocación de las Nanopartículas**

Cuando las NPs son aplicadas al follaje se absorben a través de los estomas y su translocación o transporte basipétalo hacia la base del tallo es por el floema (Figura 4). Al ser

aplicadas al suelo o en el agua de riego penetran a través de la epidermis de la raíz y la corteza, posteriormente pasan a la endodermis y finalmente entran al tejido conductivo del xilema para ser traslocados a larga distancia hasta las ramas y el follaje de las plantas (Peng, et al., 2015). Se ha señalado que las paredes y membranas celulares actúan como una eficaz barrera a la entrada de cualquier tipo de NPs, y que la efectividad de su entrada y transporte está determinado por el tamaño de los poros de la pared celular, que están en el rango de 5 a 20 nm (Fleischer, et al., 1999; Eichert, et al., 2008). Por lo tanto, sólo NPs de un tamaño menor al de los poros de la pared celular pueden pasar con facilidad y penetrar al citoplasma celular.

Los nanomateriales son considerados un factor de estrés en las plantas ya que existe la posibilidad de que puedan remodelar y modificar la estructura y constitución de las membranas y pared celular en plantas (Liu, et al., 2013).

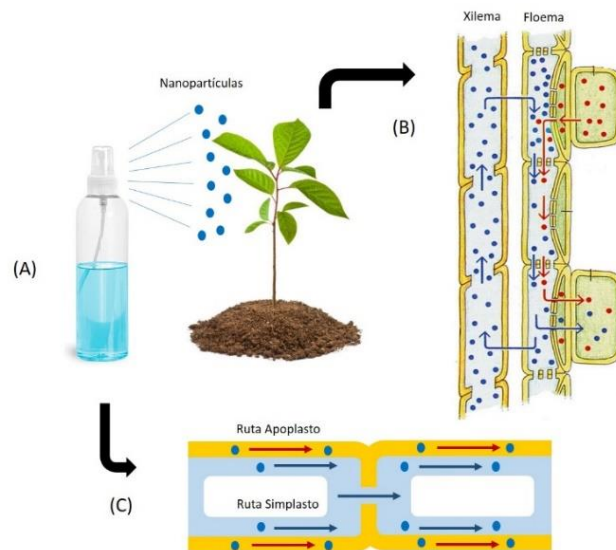


Figura 4. (A). Esquema que ilustra la aplicación de nanopartículas al follaje de las plantas. (B) Cuando son absorbidas a través de los estomas se translocan o transportan vía floema. (C) Cuando se aplican a la zona radicular su translocación a larga distancia es principalmente por el apoplasto del tejido conductivo del xilema.

Diversas investigaciones han demostrado que tanto las NPs de carbón, como las metálicas, son capaces de producir estrés en las plantas, generando un exceso de ROS (especies

reactivas del oxígeno), que pueden afectar las proteínas, lípidos, carbohidratos y ADN. Las NPs alteran la eficiencia fotosintética, la fluorescencia fotoquímica y el rendimiento cuántico en las plantas, debido a las interacciones de estas con los fotosistemas I y II, ya que estudios han demostrado que las clorofilas transfieren la energía a las NPs (Olejnik, et al., 2013; Rico, et al., 2015).

A su vez, la perturbación en la actividad fotosintética se traduce en estrés oxidativo en las plantas. El estrés oxidativo en plantas provocado por las NPs se ha investigado a través de técnicas que miden producción de ROS como  $H_2O_2$ , la activación de los mecanismos de defensa enzimáticos, la peroxidación lipídica y pérdida de electrolitos, entre las más importantes. Sin embargo, aún no se entiende completamente cómo las propiedades químicas de las NPs inducen la producción de ERO y el daño de membrana en las plantas (Huang, et al., 2011).

## **Conclusiones**

La nanotecnología es el conocimiento emergente del siglo XXI en todos los campos de la ciencia. En la agricultura su beneficio incluye la mejora de la productividad agrícola utilizando NPs como inductoras del crecimiento de las plantas, producción de nanoencapsulados para la lenta liberación de fertilizantes, así como para la formulación de nanoplaguicidas y nanoherbicidas. Con el empleo de la NT también se podrán fabricar nanosensores muy eficaces para la detección temprana de enfermedades. Además se podrá realizar la transferencia de ADN en las plantas para el desarrollo de variedades resistentes a plagas y enfermedades, así como a factores bióticos y abióticos.

## **Literatura Citada**

Amemiya, Y.; Tanaka, T.; Yoza, B.; Matsunaga, T. (2005). Novel detection system for biomolecules using nano-sized bacterial magnetic particles and magnetic force microscopy. *Journal of biotechnology*. 120: 308-314.



- Ali, M.A.; Rehman, I.; Iqbal, A.; Din, S.; Rao, A.Q.; Latif, A.; Husnain, T. (2014). Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Advancements in Life Sciences*. 1:129-138.
- A.M-Leonard Company. (2016). Horticultural Tool and Supply Company. Disponible en: <http://www.amleo.com/>. (Consultado: Agosto, 2016.)
- Burman, U.; Saini, M.; Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*. 95: 605-612.
- Capaldi, A.S.; Diniz, S.A.; Moretto, G.R.; Antunes, A.R.; Zezzi, A.M. (2015). Nanoparticles applied to plant science. A review. *Talanta*. 13: 693-705.
- Cañas, J.E.; Long, M.; Nations, S.; Vadan, R.; Dai, L.; Luo, M.; Olszyk, D. (2008). Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 27: 1922-1931.
- Chang, Y.; Zhang, M.; Xia, L.; Zhang, J.; Xing, G. (2012). The Toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. *Materials*. 5: 2850-2871.
- Ditta, A.; Arshad, M.; Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in Sustainable Agricultural Crop Production: Applications and Perspectives. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer International Publishing. 55-75pp.
- Dimkpa, C.O.; McLean, J.E.; David, W.; Britt, D.W.; Anderson, A.J. (2015). Nano CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology*. 24: 119-129.
- Dubey, A.; Mailapalli, D.R. (2016). Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer International Publishing. 307-330pp.
- Dudo, A.; Choi, D.H.; Scheufele, W. (2010). Food nanotechnology in the news. Coverage patterns and thematic emphases during the last decade. *Appetite*. 56: 78-89.
- Eichert, T.; Kurtz, A.; Steiner, U.; Goldbach, H.E. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum*. 134: 151-160.
- Fraceto, L.F.; Grillo, R.; De Medeiros, G.A.; Scognamiglio, V.; Rea, G.; Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*. 4:1-5.
- Fang, T.; Watson, J.L.; Goodman, J.; Dimkpa, C.O.; Martineau, N.; McLean, S.J.; Britt, D.W.; Anderson, A.J. (2013). Does doping with aluminum alter the effects of ZnO nanoparticles on the metabolism of soil *Pseudomonads*?. *Microbiological Research*. 168: 91-98.
- Faunce, T.; Styring, S.; Wasielewski, M.R.; Brudvig, G.W.; Rutherford, A.W.; Johannes M.; Lee, A.F.; Hill, C.L. (2013). Artificial photosynthesis as a frontier technology for energy sustainability. *Energy and Environmental Science*. 6: 1074-1076.
- Fleischer, A.; O'Neill, M.A.; Ehwald, R. (1999). The pore size of non-graminaceous plant cell walls is rapidly decreased by borate ester cross-linking of the pectic polysaccharide rhamnogalacturonan II. *Plant Physiology*. 121: 829-838.

- Foltete, A.S.; Masfaraud, J.F.; Bigorgne, E.; Nahmani, J.; Chaurand, P.; Botta, C.; Cotelle, S. (2011). Environmental impact of sunscreen nanomaterials: ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO<sub>2</sub> nanocomposites on *Vicia faba*. *Environmental Pollution*. 159: 2515-2522.
- García, A.; Espinosa, R.; Delgado, L.; Casals, E.; González, E.; Puentes, V.; Barata, C.; Font, X.; Sánchez, A. (2011). Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*. 269: 136-141.
- Grillo, R.; Pereira, A.E.; Nishisaka, C.S.; de Lima, R.; Oehlke, K.; Greiner, R.; Fraceto, L.F. (2014). Chitosan/tripolyphosphate nanoparticles loaded with paraquat herbicide: an environmentally safer alternative for weed control. *Journal of hazardous materials*. 278:163-171.
- Grillo, R.; Abhilash, P.C.; Fraceto, L.F. (2016). Nanotechnology Applied to Bio-Encapsulation of Pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 16: 1231-1234.
- Goh, P.S.; Ismail, A.F.; Ng, B.C. (2013). Carbon nanotubes for desalination: performance evaluation and current hurdles. *Desalination*. 308: 2-14.
- Gruère, G.P. (2012). Implications of nanotechnology growth in food and agriculture in OECD countries. *Food Policy*. 37: 191-198.
- Husen, A.; Siddiqi, K.S. (2014). Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *Journal of Nanobiotechnology*. 12: 1-10.
- Huang, C.; Verrillo, F.; Renzone, G. (2011). Response to biotic and oxidative stress in *Arabidopsis thaliana*: analysis of variably phosphorylated proteins. *Journal of proteomics*. 74:1934–1949.
- Jeyasubramanian, K.; Thoppey, U.U.G.; Hikku, G.S.; Selvakumar, N.; Subramania, A.; Krishnamoorthy, K. (2016). Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*. 6: 15451-15459.
- Joseph, S.; Aluru, N.R. 2008. Why are carbon nanotubes fast transporters of water?. *Nano letters*. 8: 452-458.
- Kyung-Seok, K.S.; Kong, I.C. (2014). Toxic effects of nanoparticles on bioluminescence activity, seed germination, and gene mutation. *Applied microbiology and biotechnology*. 98: 3295-3303.
- Kashyap, P.L.; Xiang, X.; Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International journal of biological macromolecules*. 77: 36-51.
- Krishnaraj, C.; Ji, B.J.; Harper, S.L.; Yun, S.I. (2016). Plant extract-mediated biogenic synthesis of silver, manganese dioxide, silver-doped manganese dioxide nanoparticles and their antibacterial activity against food-and water-borne pathogens. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 1: 1-14.
- Khodakovskaya, M.V.; de Silva, K.; Nedosekin, D.A.; Dervishi, E.; Biris, A.S.; Shashkov, E.V.; Zharov, V.P. (2011). Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108: 1028-1033.
- Kottegoda, N.; Munaweera, I.; Madusanka, N.; Karunaratne, V. (2011). A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Current Science (Bangalore)*. 101: 73-78.

- 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.
- Lei, Z.; Mingyu, S.; Xiao, W.; Chao, L.; Chunxiang, Q.; Liang, C.; Fashui, H. (2008). Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biological Trace Element Research*. 121: 69-79.
- Lin, D.; Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*. 150: 243-250.
- Liu, X.; Feng, Z.; Zhang, S.; Zhang, J.; Xiao, Q.; Wang, Y. (2006). Preparation and testing of cementing nano-subnano composites of slower controlled release of fertilizers. *Scientia Agricultura Sinica*. 39: 1598-1604.
- Liu, Q.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Lin, J.; Shu, C.; Wang, C.; Fang, X. (2013). Fullerene-induced increase of glycosyl residue on living plant cell wall. *Environmental science and technology*. 47: 7490-7498.
- Liu, Q.; Chen, B.; Wang, Q.; Shi, X.; Xiao, Z.; Lin, J.; Fang, X. (2009). Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. *Nano letters*. 9: 1007-1010.
- Liu, R. Q.; Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*. 514: 131-139.
- Manimaran, M. (2015). A review on nanotechnology and its implications in agriculture and food industry. *Asian Journal of Plant Science and Research*. 5:13-15.
- Martínez-Fernández, D.; Barroso, D.; Komárek, M. (2016). Root water transport of *Helianthus annuus* L. under iron oxide nanoparticle exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 23: 1732-1741.
- Mishra, S.; Singh, H.B. (2015). Biosynthesized silver nanoparticles as a nanoweapon against phytopathogens: exploring their scope and potential in agriculture. *Applied microbiology and biotechnology*. 99: 1097-1107.
- Naderi, M.R.; Shahraki, D.A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Sci. 5:2229-2232.
- Nuruzzaman, M.; Rahman, M.M.; Liu, Y.; Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *Journal of agricultural and food chemistry*. 64: 1447-1483.
- Olejnik, M.; Krajnik, B.; Kowalska, D.; Twardowska, M.; Czechowski, N.; Hofmann, E.; Mackowski, S. (2013). Imaging of fluorescence enhancement in photosynthetic complexes coupled to silver nanowires. *Applied Physics Letters*. 102: 083-703.
- Pandey, A.C.; Sanjay, S.S.; Yadav, R.S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental nanoscience*. 5:488-97.
- Panwar, J.; Jain, N.; Bhargaya, A.; Akhtar, M.S.; Yun, Y.S. (2012). Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nano-fertilizers. *International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT)*. Malaysia. 8 pp.
- Panpatte, D.G.; Jhala, Y.K.; Shelat, H.N.; Vyas, R.V. (2016). Nanoparticles: The Next Generation Technology for Sustainable Agriculture. In *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*, book. Springer India. 289-300pp.

- Parker, J.L.; Newstead, S. (2014). Molecular basis of nitrate uptake by the plant nitrate transporter NRT1. 1. *Nature*. 507: 68-72.
- Pérez-de Luque, A.; Rubiales, D. (2009). Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest management science*. 65: 540-545.
- Peckys, D.B.; Melechko, A.V.; Simpson, M.L.; McKnight, T.E. (2009). Immobilization and release strategies for DNA delivery using carbon nanofiber arrays and self-assembled monolayers. *Nanotechnology*. 20: 1-8.
- Peng, C.; Duan, D.; Xu, C.; Chen, Y.; Sun, L.; Zhang, H.; Yuan, X.; Zheng, L.; Yang, Y.; Yang, J.; Zhen, X.; Chen, Y.; Shi, J. (2015). Translocation and biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*. 197: 99-107.
- Prasad, T.N.; Sudhakar, P.; Sreenivasulu, Y.; Latha, P.; Munaswamy, V.; Reddy, K.R.; Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of plant nutrition*. 35: 905-927.
- Prasad, R.; Kumar, V.; Prasad, K.S. (2014). Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.
- Ranjan, S.; Dasgupta, N.; Chakraborty, A.R.; Samuel, S.M.; Ramalingam, C.; Shanker, R.; Kumar, A. (2014). Nanoscience and nanotechnologies in food industries: opportunities and research trends. *Journal of nanoparticle research*. 16: 1-23.
- Raliya, R.; Tarafdar, J. C. (2013). ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Agricultural Research*. 2: 48-57.
- Rai, M.; Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied microbiology and biotechnology*. 94:287-293.
- Raskar, S.V.; Laware, S.L. (2014). Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal Current Microbiology Applied Science*. 3:467-473.
- Ramesh, M.; Palanisamy, K.; Babu, K.; Sharma, N.K. (2014). Effects of bulk and nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn. *Journal of Global Biosciences*. 3: 415-422.
- Razzaq, A; Ammara, R.; Jhazab, H.M.; Mahmood, T.; Hafeez, A.; Hussain, S. (2016). Journal of Nanoscience and Technology. *Journal of Nanoscience and Technology*. 2: 55-58.
- Rezaei, M.; Abbasi, H. (2014). Foliar application of nanochelate and non-nanochelate of zinc on plant resistance physiological processes in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Iranian Journal of Plant Physiology*. 4: 1137-1144.
- Rehman, H.; Aziz, T.; Farooq, M.; Wakeel, A.; Rengel, Z. (2012). Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and soil*. 361: 203-226.
- Rico, C.M.; Peralta-Videa, J.R.; Gardea-Torresdey, J.L. (2015). Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. Springer International Publishing. pp. 1-17.
- Sabir, S.; Arshad, M.; Chaudhari, S.K. (2014). Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. *The Scientific World Journal*. 1:1-8.
- Scott, N.; Chen. H. (2013). Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems. *Industrial Biotechnology*. 9: 17-18.

- Sekhon, B.S. (2014). Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, science and applications*. 7: 31–53.
- Servin, A.D.; White, J.C. (2016). Nanotechnology in Agriculture: Next Steps for Understanding Engineered Nanoparticle Exposure and Risk. *Nano Impact*. 1: 9-12.
- Sedghi, M.; Hadi, M.; Toluie, S.G. (2013). Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals. West. Univ. Timisoara Ser. Biol*. 16: 73-78.
- Siddiqui, H.M.; Al-Whaibi, H.; M., Mohammad, F. (Editors). (2015). *Nanotechnology and Plant Sciences. Nanoparticles and Their Impact on Plants*. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-14502-0 (eBook). 305 pp.
- Singh, A.; Singh, N.B.; Hussain, I.; Singh, H.; Singh, S.C. (2015). Plant-nanoparticle interaction: an approach to improve agricultural practices and plant productivity. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. 4: 25-40.
- Song, G.; Gao, Y.; Wu, H.; Hou, W.; Zhang, C.; Ma, H. (2012). Physiological effect of anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles on *Lemna minor*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 31: 2147-2152.
- Shyla, K.K.; Natarajan, N. (2014). Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*, 7: 1376-1381.
- Sharma, P.; Deepesh, B.; Zaidi, M.G.H.; Pardha, P.; Khanna, P.K.; Sandeep, A. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 167: 2225-2233.
- Tarafdar, J.C.; Raliya, R.; Mahawar, H.; Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*. 3:257-262.
- Vanderroost, M.; Ragaert, P.; Devlieghere, F.; De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: the next generation. *Trends in Food Science and Technology*. 39: 47–62.
- Villagarcía, H.; Dervishi, E.; de Silva, K.; Biris, A.S.; Khodakovskaya, M.V. (2012). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small*. 8: 2328-2334.
- Wang, S.; Liu, H.; Zhang, Y.; Xin, H. (2015). Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*, 34: 554-561.
- Vimala, V.; Clarke, S.K.; Urvinder Kaur, S. (2016). Pesticides detection using acetylcholinesterase nanobiosensor. *Biosens Journal*, 5: 1-4.
- Xue, J.; Z. Luo; L., Li; P., Ding; Cui, Y.; Wu, Q. (2014). A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*. 4: 1-9.
- Yadollahi, A.; Arzani, K.; Khoshghalb, H. (2009). The role of nanotechnology in horticultural crops postharvest management. In *Southeast Asia Symposium on Quality and Safety of Fresh and Fresh-Cut Produce* 875. 49-56pp.
- Yin, Y.; Guo, Q.; Han, Y.; Wang, L.; Wan, S. (2012). Preparation, characterization and nematicidal activity of lansiumamide B nano-capsules. *Journal of Integrative Agriculture*. 11: 1151-1158.

- Zhang, D.; Hua, T.; Xiao, F.; Chen, C.; Gersberg, M.R.; Liu, Y.; Stuckey, D.; Ng, J.W.; Tan, K.S. (2015). Phytotoxicity and bioaccumulation of ZnO nanoparticles in *Schoenoplectus tabernaemontani*. *Chemosphere*. 20: 211-219.
- Zhao, L.; Sun, Y.; Hernandez, V.J.; Servin, A.D.; Hong, J.; Niu, G.; Peralta, V.J.; Duarte, G.M.; Gardea, T.J. (2014). Influence of CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study. *Journal of agricultural and food chemistry*. 61: 11945-11951.
- Zhu, H.; Han, J.; Xiao J. Q.; Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal Environmental Monitoring*. 10: 685-784.