

Revista Electrónica Nova Scientia

Promoción del crecimiento en plantas de
Capsicum annuum por nanopartículas de óxido
de zinc

Growth promotion of *Capsicum annuum* plants
by zinc oxide nanoparticles

**B. Méndez-Argüello¹, I. Vera-Reyes², E. Mendoza-Mendoza³,
L.A. García-Cerda³, B.A. Puente-Urbina³ y R.H. Lira-
Saldívar¹**

¹Departamento de Plásticos en la Agricultura, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila

²Cátedras CONACYT, Centro de Investigación en Química Aplicada

³Departamento de Materiales Avanzados, Centro de Investigación en Química Aplicada

México

Nombre del autor para correspondencia. Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar; E-mail: hugo.lira@ciqa.edu.mx

Resumen

Las aplicaciones de la nanotecnología (NT) en los sistemas agrícolas son diversas, ofreciendo el potencial para mejorar significativamente su productividad y eficiencia al reducir costos y cantidades de agroquímicos aplicados. Las nanopartículas (NPs) metálicas de óxido de zinc, cobre y hierro, ya sean puras o mezcladas con plata, están siendo estudiadas globalmente por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nanofertilizantes y antimicrobiales. Considerando lo antes señalado, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de NPs de óxido de zinc puras (NPsZnO) y con plata (NPsZnO+Ag) en el crecimiento de plantas de chile (*Capsicum annuum*). La síntesis y caracterización de las NPs mencionadas se realizó mediante el método de sol-gel. La aplicación foliar de las NPs a las plantas se hizo semanalmente; el diseño experimental empleado fue completamente al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Los datos obtenidos se procesaron mediante un análisis de varianza y prueba de rango múltiple Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados señalan que las plantas expuestas a la aplicación de NPsZnO + Ag al 2.5% en peso, tuvieron significativamente mayor crecimiento y producción de biomasa en comparación con las plantas del tratamiento control, mostrando valores superiores de altura (16.8%), área foliar (30.3%), producción de biomasa total (59.5%), biomasa seca de raíz (112.5%), biomasa seca de tallo (76%) y longitud de raíz (24.4%). También se observó un incremento del índice de clorofila (8%) y número de hojas (32.6%). El efecto promotor de crecimiento de las NPs aplicadas podría atribuirse a la actividad del zinc como precursor de la producción de auxinas que promueven división y elongación celular; así como por su influencia en la reactividad del ácido indolacético, el cual actúa como fitoestimulante hormonal. También puede ser factible que las NPs estudiadas estén involucradas en la biosíntesis de citoquininas y giberelinas; así como en la inducción de mayor actividad de enzimas antioxidantes.

Palabras Clave: Agronanotecnología, nanomateriales, nanofertilizantes, horticultura

Recepción: 30-03-2016

Aceptación: 15-08-2016

Abstract

The applications that nanotechnology (NT) has on agriculture systems are diverse and promising because they have the potential to contribute in maintaining its productivity and efficiency by reducing costs and the quantity of synthetic agrochemicals employed. For instance, it is important to emphasize that by means of NT it is possible to develop encapsulated nanopesticides, stabilization of biopesticides and slow-release fertilizers. Nanoparticles of zinc oxide and silver are studied for their potential as antimicrobial, nanofertilizers and growth promoters of agricultural plants. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of pure zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) and ZnONPs with silver (ZnONPs + Ag) on growth of *C. annuum* plants. The sol-gel method was used to study the synthesis and characterization of NPs. Foliar application of ZnONPs to pepper plants was done manually once a week. The experimental design was completely at random with four treatments and five repetitions. Data collected were analyzed by ANOVA and Tukey's multiple range tests ($p \leq 0.05$). Compared to control plants without the application of ZnONPs, treatments exposed to the application of ZnONPs + Ag (2.5%), were those that had a significant higher shoot and root growth, as well greater biomass production, with higher values of height (16.8%), leaf area (30.3%), total biomass production (59.5%), root dry biomass (112.5%), stem dry biomass (76%) and root length (24.4%). As compared to control plants, those treated with ZnONPs + Ag (2.5%) reported a quantitative increase of chlorophyll index (8%) and leaf number (32.6%). The biological effect of the applied NPs, could be related to the zinc activity as a precursor in the production of auxins, which in turn could promote cell division and elongation, as well by its influence on the reactivity of indol acetic acid, which acts as hormonal phytoestimulant. Also ZnONPs might be involved in the biosynthesis of cytokinins and gibberellins; as well on the induction of greater activity of antioxidant enzymes.

Keywords: Agronanotechnology, nanomaterials, nanofertilizers, horticulture.

Introducción

El uso de grandes cantidades de fertilizantes en la agricultura intensiva tradicional provoca contaminación del suelo, agua y plantas, dañando así a los ecosistemas, seres humanos y animales. Por eso, la agronanotecnología como conocimiento emergente procura encontrar métodos ecoamigables para mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de las prácticas agrícolas modernas (Grillo, et al., 2016 1231; Ditta et al., 2015 55), así como para el control de enfermedades de los cultivos (Patel et al., 2014 71). Reportes recientes señalan que diversas NPs metálicas mejoran significativamente el crecimiento de las plantas y tienen el potencial de ser usadas como nanofertilizantes para incrementar la productividad agrícola (Liu et al., 2016 1).

Esta tecnología también está orientada a usar menos agroquímicos sintéticos y a reducir la generación de residuos contaminantes, buscando incrementar el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Servin et al., 2015 91). La NT empleando métodos emergentes se orienta a la elaboración, caracterización y utilización de materiales con dimensiones muy pequeñas (< 100 nm), con orden de magnitud de 10^9 , lo que significa en la escala atómica y molecular (Duran y Marcato, 2013 1227). En este grupo de materiales se encuentran varias NPs metálicas (Zn, Fe, Cu, Ag, etc.), teniendo muchas de ellas gran potencial en la agricultura debido a que pueden ser utilizadas como nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015 133; Naderi y Danesh-Shahraki, 2013 2229), nanoherbicidas (Yadav y Srivastava, 2015 21), nanopesticidas (Dubey y Mailapalli, 2016 307) y nanosensores (Servin et al., 2015 2).

Las NPsZnO han recibido especial importancia en la industria de los cosméticos, textiles, medicina, electrónica y en la producción de alimentos. Se ha señalado que estas NPs reducen la presencia de enfermedades por su actividad antifúngica contra *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium culmorum* y *Fusarium oxysporum* (Rajiv et al., 2013 385; He et al., 2011 207). Su efecto antifúngico se debe en parte porque causan malformación de hifas que provocan la muerte de los hongos (Servin et al., 2015 9). También se ha señalado que las NPsZnO mejoran el crecimiento de las plantas (Liu y Lal, 2015 135) y mejoran la calidad de los frutos al incrementar la concentración de azúcar (Zhao et al., 2014 11945), aunque algunos otros reportes indican un efecto opuesto, ya que se ha consignado un efecto fitotóxico en diferentes plantas cultivadas (Dimpka et al., 2015 119; Bandyopadhyay et al., 2014 60).

Por eso se reporta que las NPs pueden tener aplicaciones como nanofertilizantes (Subramanian et al., 2015 69), nanofungicidas (Kumar et al., 2016 101) y antimicrobiales para la protección de los cultivos (Shende et al., 2015 865). Diversos estudios señalan que la aplicación de NPs metálicas como zinc (Pandey et al., 2010 488; Prasad et al., 2012 913) y plata (Salama, 2012 192), han mostrado efectos significativos en la germinación de semillas y en el crecimiento de plantas (Burman et al., 2013 607); sin embargo, la información relacionada con el efecto de NPsZnO adicionadas o dopadas con plata es casi inexistente. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto en el crecimiento de plantas de *C. annuum* debido a la aplicación foliar de NPsZnO puras, y dopadas con plata al 1.25 y 2.5% en peso.

Método

Síntesis de las nanopartículas

Se realizaron los cálculos para determinar la cantidad de reactivos iniciales de acuerdo con la composición estequiométrica que deben tener las NPsZnO, NPsZnO+Ag (1.25%) y NPsZnO+Ag (2.5%). Se usaron nitratos de Zn y Ag como fuentes metálicas, ácido cítrico y etilenglicol como agentes quelantes y polimerizantes. La preparación de las NPs se llevó a cabo de con el siguiente procedimiento: primeramente, fue disuelta la cantidad establecida de ácido cítrico en 60 ml de agua destilada, a esta solución le fue añadida la cantidad correspondiente de sales metálicas y se sometió a agitación durante 15 min hasta la completa disolución de sales. Después se agregó la cantidad correspondiente de etilenglicol y se continuó con la agitación hasta obtener una solución homogénea. Las soluciones fueron vertidas en cajas de teflón y colocadas en una estufa de secado a una temperatura de 120 °C durante 24 h para obtener un material precursor seco. Este material fue pulverizado en un mortero de ágata, pesado para someterlo a un tratamiento de calcinación a 500 °C en atmósfera de aire por 2 h. Las NPs obtenidas fueron analizadas por difracción de rayos X (XRD) para conocer su estructura cristalina y por microscopía electrónica de barrido (SEM) y de transmisión (TEM) para estudiar su tamaño y morfología.

Manejo del cultivo.

La siembra de las semillas de pimiento dulce, variedad California (Wonder, Crown seed Heber California USA), fue en charolas de poliestireno de 200 cavidades con sustrato orgánico peat moss en condiciones de invernadero. El trasplante se realizó en macetas de polietileno de 1 L de

capacidad cuando presentaron un par de hojas verdaderas y altura promedio de 3.8 cm. Se aplicó fertilización de fondo NPK (150-80-80 mg/maceta respectivamente). Como sustrato de siembra se empleó una mezcla de peat moos: perlita: zeolita (50:30:20 v/v). Durante el desarrollo del cultivo se aplicó riego con sistema automatizado, y cada tercer día se fertilizó con una solución Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950, 32), la duración del experimento fue de 50 días.

Aplicación de NPs al follaje de las plantas

Las soluciones con las NPsZnO puras y con Ag al 1.25 y 2.5% en peso, fueron preparadas con una concentración de 50 mg L⁻¹ en agua desionizada y dispersadas con un sonicador Branson 2510 por 30 minutos en dos tiempos de 15 minutos. La aplicación foliar de las NPs se realizó de manera manual una vez por semana, usando 1 ml de la solución planta⁻¹ para cubrir el follaje, durante 21 días.

Determinación del crecimiento y biomasa

Se midió altura de la planta, área foliar (LI-COR modelo LI-300, Lincoln, Nebraska, USA), número de hojas, índice de clorofila (Minolta SPAD 502), longitud de raíz y biomasa seca (hojas, tallo, raíz). Estas mediciones se hicieron al final del experimento en todas las plantas.

Detección de peróxido de hidrogeno mediante tinción 3,3'-diaminobencidina (DAB)

La detección *in situ* de peróxido de hidrogeno se realizó tiñendo con 3,3'-diaminobencidina (DAB) usando la metodología propuesta por Daudi et al. (2012, 285). El DAB es oxidado por el peróxido de hidrógeno en presencia de algunas proteínas que contienen hemo, tales como peroxidasas, para generar un precipitado de color marrón oscuro. Este precipitado se explota como una mancha para detectar la presencia y distribución de peróxido de hidrógeno en el tejido vegetal.

Análisis estadístico de datos

El diseño experimental empleado fue completamente al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones cada uno, en donde cada planta fue una repetición. Los tratamientos aplicados fueron los siguientes: T1 = Control; T2 = NPsZnO puras; T3 = NPsZnO con plata 1.25% en peso; T4 = NPsZnO con plata, 2.5% en peso. El análisis de las variables fisiológicas se realizó mediante un

ANVA y prueba de rango múltiple (Tukey $p \leq 0.05$) con el software estadístico SAS-JMP versión 5.0.1 (2002).

Resultados

Caracterización de nanopartículas por difracción de rayos X

El patrón de difracción de las NPsZnO + Ag al 2.5% en peso se presenta en la Figura 1. Para facilitar la identificación de las especies cristalinas presentes se incluyen los difractogramas reportados en el banco de datos del ICDD (International Centre for Diffraction Data). En el patrón de difracción se detectaron las reflexiones características del ZnO y de Ag. Debe notarse la intensidad de los picos de ZnO y Ag, que demuestra la cristalinidad de dichas fases, así como la nula existencia de reflexiones adicionales relacionadas con fases secundarias indeseables.

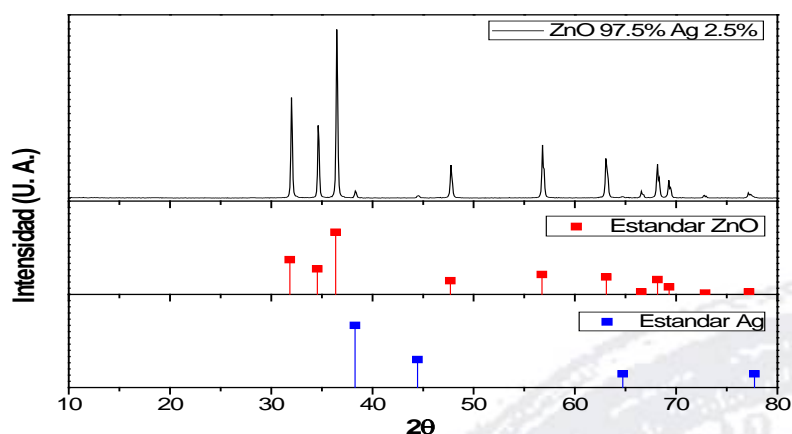


Figura 1. Difractograma de las nanopartículas de ZnO + Ag (2.5% en peso).

Caracterización de nanopartículas por microscopía electrónica de transmisión

Respecto a la caracterización de las nanopartículas sintetizadas de ZnO y ZnO + Ag, en la Figura 2 se muestran micrografías de microscopía electrónica de transmisión (TEM) de las NPsZnO puras (A) y NPsZnO + Ag al 2.5% en peso (B). Se puede apreciar que las NPs que se sintetizaron tienen forma irregular aunque con tendencia a esférica y tamaños menores a 200 nm. Para las NpsZnO + Ag, el tamaño de las partículas es menor a 100 nm. De estas micrografías es difícil distinguir entre las partículas de ZnO y Ag, por lo que se tomaron nuevas micrografías en el modo de barrido del TEM (STEM), en la Figura 2C se observa la micrografía de la muestra de NPsZnO + Ag en la misma relación antes mencionada. Las partículas de mayor tamaño

corresponden al ZnO y se observan pequeñas partículas (más brillantes) que corresponden a las de plata.

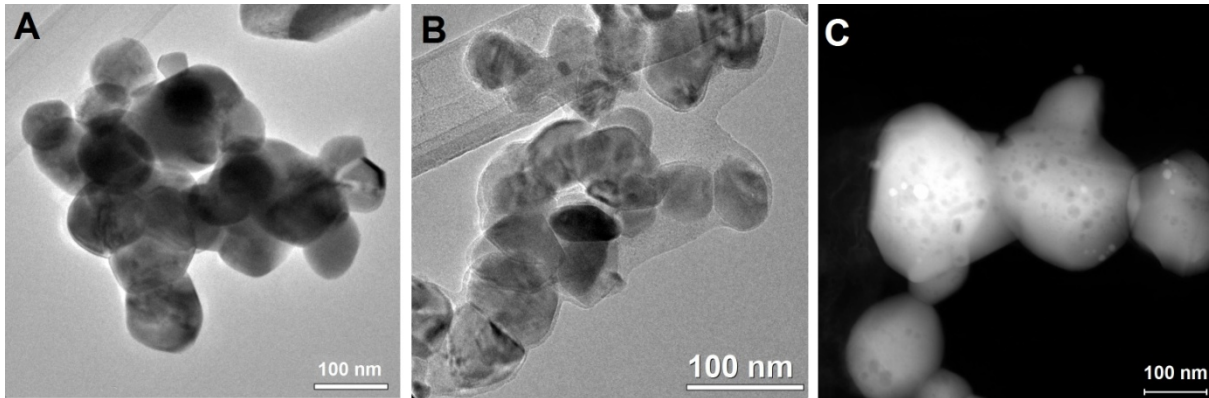


Figura 2. Microscopía electrónica de transmisión (TEM) de: A) nanopartículas de óxido de zinc puras, B) nanopartículas de óxido de zinc con plata al 2.5% en peso y (C) micrografía en modo STEM de nanopartículas de óxido de zinc con plata al 2.5% en peso

Comportamiento fisiológico de las plantas

El efecto de las NPsZnO puras, así como las dopadas con Ag al 1.25 y 2.5% en algunas variables de respuesta de las plantas de *C. annuum*, se presenta en el Tabla 1. Se puede detectar que las plantas sometidas a la aplicación foliar de NPsZnO + Ag al 1.25 y 2.5% respectivamente, presentaron mayor producción de biomasa seca, crecimiento de la parte aérea (Figura 3) y radicular (Figura 4) en comparación con el tratamiento control.

Tabla 1. Efecto de la aplicación al follaje de NPsZnO puras y dopadas con Ag, en diferentes variables fisiológicas de *C. annuum*.

Variables	Tratamientos				p>F
	Control	NPsZnO puras	NPsZnO + Ag 1.5%	NPsZnO + Ag 2.5%	
Peso seco raíz (g)	0.24±0.02b	0.24±0.02b	0.46±0.05a	0.51±0.05a	0.0003*
Peso seco tallo (g)	0.13±0.01b	0.12±0.0b	0.23±0.01a	0.23±0.01a	0.0001*
Peso seco hojas (g)	0.50±0.05a	0.53±0.04a	0.66±0.06a	0.67±0.04a	0.058ns
Índice clorofila (U Spad)	47.16±1.26a	51.66±0.53a	50.08±1.37a	51.1±1.36a	0.07ns
Número de hojas	20.2±2.17a	20.8±1.24a	22.6±3.6a	26.8±2.9a	0.328ns

Medias (n = 5) ± error estándar de la media. Letras diferentes en la misma fila son estadísticamente diferentes.

*Diferencia estadística (Tukey, p<0.05). ns>No significancia entre tratamientos.



Figura 3. Crecimiento promedio diferenciado de plantas de *C. annuum* debido a la aplicación foliar de nanopartículas de ZnO puras y con plata a las concentraciones de 1.25 y 2.5% en peso.

Respecto a las plantas del tratamiento control, aquellas tratadas con NPsZnO + Ag al 2.5% (T4), mostraron el mayor incremento en altura (16.8%; Figura 5A), área foliar (30.3%; Figura 5B), biomasa seca total (59.5%; Figura 5C), biomasa seca de raíz (112.5 %; Tabla 1), biomasa seca de tallo (76%; Tabla 1) y longitud de raíz (24.4%; Figura 5D). Además, con este mismo tratamiento se observó un incremento (8%) del índice de clorofila (Tabla 1) y un aumento (32.6%) en el número de hojas (Tabla 1).



Figura 4. Desarrollo radicular de plantas de *C. annuum* que recibieron nanopartículas de ZnO puras y con plata a las concentraciones de 1.25 y 2.5% en peso.

Cuando se aplicaron NPsZnO + Ag al 1.25% (T3), se incrementó significativamente la altura (16.8%, Figura 5A), área foliar (28.31%, Figura 5B), biomasa seca (52.8%, Figura 5C) y longitud de raíz (23.7%, Figura 5D), en relación con el tratamiento control. También se consignó un incremento en el número de hojas (11.8%) e índice de clorofila (6.19%), aunque estos resultados no fueron estadísticamente significativos (Tabla 1). Por otro lado, la aplicación de NPsZnO puras (T2) incrementaron la longitud de la raíz (11.8% Figura 5D), con respecto al control.

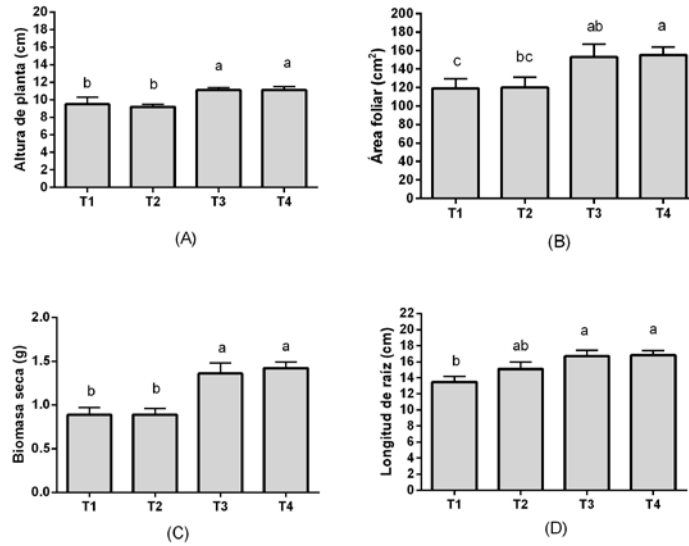


Figura 5. Crecimiento y producción de biomasa en plantas de *C. annuum* por efecto de nanopartículas de óxido de zinc puras y con Ag. A) Altura de planta, B) área foliar, C) biomasa seca y D) longitud de raíz. T1 = control, T2 = NPsZnO puras, T3 = NpsZnO + Ag al 1.25% y T4=NpsZnO + Ag al 2.5%. Medias (n = 5), las barras representan el error estándar de la media, letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, p ≤ 0.05).

La potencial fitotoxicidad de las NPs puede ser causada por un exceso endógeno en la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO). Por tal motivo, realizamos experimentos de visualización de la producción de peróxido de hidrógeno en hojas. En la Figura 6 se muestra la producción de H₂O₂ debido a la aplicación de NPs después de 24 h. Todos los tratamientos mostraron producción de esta especie reactiva de oxígeno (Figura 6 B, C y D). Sin embargo, la hojas con mayor deposición de H₂O₂ fueron las tratadas con NPsZnO + Ag al 2.5 %. Posterior a este tiempo fue disminuyendo, por lo que suponemos una activación del sistema antioxidante de la planta.

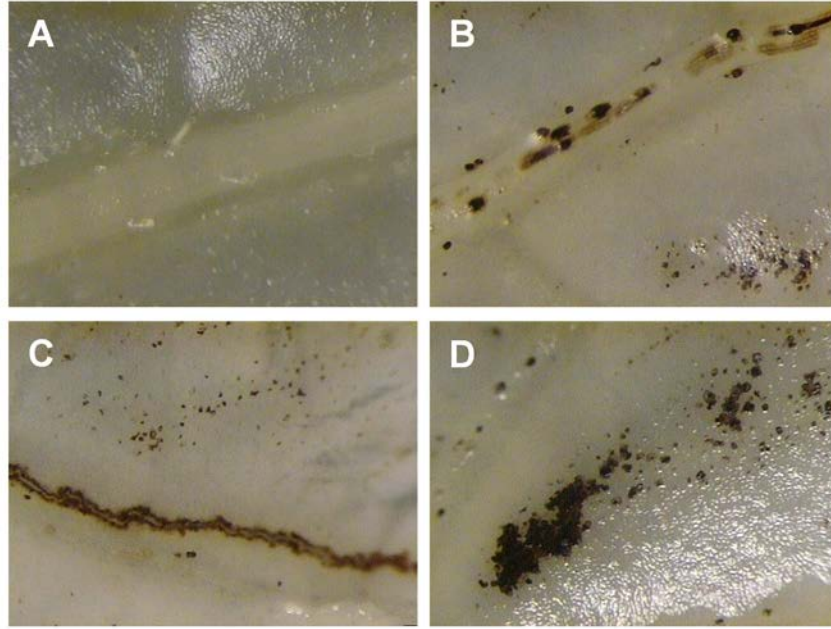


Figura 6. Tinción con DAB para detectar la formación de H_2O_2 *in situ* en plantas de *C. annuum* sometidas a la aplicación de nanopartículas de ZnO. A) Hojas de plantas control; B) Hojas de plantas tratadas con NPsZnO puras; C) Hojas de plantas tratadas con NPsZnO + Ag al 1.25 %; D) Hojas de plantas tratadas con NPsZnO + Ag al 2.5 %. (Amplificación 40 X).

Discusión

El efecto promotor del crecimiento en plantas de *C. annuum* por las NPsZnO observado en esta y otras investigaciones no está totalmente esclarecido. Navarro et al. (2008 372) Argumentan que los materiales de tamaño nanométrico con mayores áreas superficiales podrían absorber, translocar y retener de manera más eficiente los nutrientes en las plantas. Otros autores señalan que el aumento en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, puede ser el resultado de la inhibición o control de alguna enfermedad por las NPsZnO (Servin et al., 2015, 2). Por su parte, Tarafdar et al. (2014 257) Reportan que estas NPs incrementan la actividad de ciertas enzimas como la fitasa, fosfatasa ácida y alcalina, las que pueden estar contribuyendo a la solubilización de un nutriente como el fósforo orgánico y su absorción por las plantas.

También se reporta que las NPs influyen significativamente en diversos aspectos fisiológicos y en mayor crecimiento de la raíz y tallo en cultivos hortícolas como *Pisum sativum* (Mukherjee et al., 2014 132). Esto puede ser debido a una mayor producción de ácido indolacético, el cual funciona como fitoestimulante hormonal, promoviendo así mayor velocidad de crecimiento (Pandey et al., 2010 493; Shyla y Natarajan, 2014 1379). Además, el zinc es considerado como uno de los ocho

micronutrientes esenciales para las plantas, necesario en pequeñas cantidades, pero crucial para el buen desarrollo vegetativo (Pandey et al., 2010 489), ya que este micronutriente es precursor en la producción de auxinas fitorreguladoras del crecimiento, las cuales influyen en la elongación y división celular (Rehman et al., 2012 205). El zinc también desempeña una importante función en la producción de clorofila y por ende en la fotosíntesis, así como en mayor velocidad de germinación, producción de polen y biomasa (Prasad et al., 2012 906).

Diversos reportes concuerdan con los resultados obtenidos en esta investigación. Panwar et al. (2012 1) Señalan mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cuando aplicaron 20 mg L⁻¹ de NPsZnO al follaje; además, encontraron concentraciones de Zn en las hojas, confirmando con ello que ocurrió la absorción en los estomas y su translocación basipétala vía floema. Otro estudio realizado por Prasad et al. (2012 912) Revelan que en semillas y plantas de cacahuete (*Arachis hypogaea*) una concentración de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO promovió mejor germinación, así como mayor elongación de raíz y tallo. En plantas de soya (*Glycine max*) la dosis de 1 g L⁻¹ de NpsZnO promovió efectos significativos en germinación y crecimiento, en comparación con las plantas no tratadas (Sedghi et al., 2013 76).

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los reportados por Zhao et al. (2014 11949) en plantas de pepino (*Cucumis sativus*) que mostraron incrementos significativos en longitud y biomasa seca de la raíz con la incorporación al suelo de 400 y 800 mg kg⁻¹ de NpsZnO, al igual que los resultados obtenidos por la aplicación foliar de 1.5 y 10 ppm de NpsZnO a plántulas de garbanzo (*Cicer arietinum*), ya que originaron mayor altura y biomasa seca. En ese mismo estudio se ha destacado que la aplicación de zinc en forma de nanofertilizante promueve el crecimiento de las plantas. Se ha sugerido que esa inducción del crecimiento se debe a que el zinc tiene una función muy importante como cofactor de enzimas involucradas en el proceso fotosintético, así como en la integridad y mantenimiento de las membranas celulares de las plantas (Burman et al., 2013 607). Es quizá por eso y otros beneficios fisiológicos y bioquímicos que las NPsZnO y otras nanopartículas, pudieran revolucionar la agricultura moderna (Sabir et al., 2014).

En la literatura concurre la ambivalencia sobre los efectos causados por estos nanomateriales. En ciertas investigaciones se informa que dosis bajas inducen crecimiento, mientras que las altas provocan fitotoxicidad. Lin y Xing (2008, 5582) señalan que la aplicación de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO en zacate rye grass (*Lolium perenne*), causa una reducción en la biomasa; al afectar el crecimiento apical de la raíz, también observaron que las células corticales y epidermales se colapsaron, indicando lo anterior respuestas fitotóxicas por las NPs. En plantas de calabaza (*Cucurbita pepo*), las NPsZnO afectaron negativamente la producción de biomasa con la aplicación de 1000 mg L⁻¹ (Stampoulis et al., 2009 9476). Nosotros encontramos que una concentración de 50 mg L⁻¹ induce la producción de H₂O₂ en las hojas, la cual se incrementa conforme aumenta la concentración de plata, lo que sugiere un aumento en la producción endógena de especies reactivas de oxígeno y una potencial fitotoxicidad que parece revertirse por el sistema antioxidante vegetal.

Por otra parte, se ha reportado que las NPsAg inducen un incremento de la longitud de la raíz, biomasa seca, mayor contenido de proteína, clorofila y carbohidratos; también inducen la activación de enzimas antioxidantes, resultando eso en una reducción de los niveles de especies reactivas de oxígeno (Salama, 2012 194; Sharma et al., 2012 2232), que pueden causar fitotoxicidad. La plata ha sido relacionada con el incremento de fitoreguladores de crecimiento como las citoquininas y giberelinas, las cuales participan en la división celular; asimismo este metal está involucrado con la concentración de etileno. Esta fitohormona influye en varios procesos como la germinación de semillas, senescencia, así como en respuestas de las plantas al estrés (McDaniel y Binder, 2012 26096). Otro factor que puede contribuir a los efectos positivos de las NPs aplicadas, es su tamaño nanométrico, debido a que producen mayor reactividad en el sistema vascular y celular de las plantas, en comparación con las mismas partículas pero de tamaño micrométrico, ya que el tamaño nano les permite permear fácilmente a través de las paredes y membranas celulares, incidiendo así de manera más directa en los diferentes organelos de las células (Prasad et al., 2012 921).

Conclusiones

La aplicación foliar de NPsZnO puras y con Ag a las concentraciones de 1.25 y 2.5% molar, mejoraron significativamente el crecimiento y producción de biomasa seca en plantas de C.

annuum. El efecto promotor podría estar relacionado con la actividad que tiene el zinc como precursor en la síntesis de auxinas que promueven la división celular, así como por su influencia en la reactividad del ácido indolacético, el cual funciona como fitoestimulante hormonal. Además, es posible que las NPsAg pudieran estar involucradas en una mayor producción de las fitohormonas citoquinina y giberelina; aparte de inducir la actividad de enzimas antioxidantes.

Agradecimientos

Bulmaro Méndez-Argüello agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por el apoyo recibido mediante la beca posdoctoral número 230282.

Referencias

Bandyopadhyay, S., Plascencia-Villa, G., Mukherjee, A., Rico, C.M., José-Yacamán, M., Peralta-Videa, J.R. y Gardea-Torresdey, J.L. (2015). Comparative phytotoxicity of ZnO NPs, bulk ZnO, and ionic zinc onto the alfalfa plants symbiotically associated with *Sinorhizobium meliloti* in soil. *Science of the Total Environment*, 515: 60-69.

Burman, U., Saini, M. y Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95: 605-612.

Daudi, A., Cheng, Z., O'Brien, J.A., Mammarella, N., Khan, S., Ausubel, F.M. y Bolwell, G.P. (2012). The apoplastic oxidative burst peroxidase in *Arabidopsis* is a major component of pattern-triggered immunity. *The Plant Cell*, 24: 275-287.

Dimkpa, C.O., McLean, J.E., Britt, D.W. y 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.

Ditta, A., Arshad, M., y Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and Perspectives. In *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 55-75). Springer International Publishing.

Dubey, A. y Mailapalli, D.R. (2016). Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.

Duran, N. y Marcato, P.D. (2013). Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 48: 1127-1134.

Grillo, R., Abhilash, P.C. y Fraceto, L.F. (2016). Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16: 1231-1234.

He, L., Liu, Y., Mustapha, A. y Lin, M. (2011). Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. *Microbiological Research*, 166: 207-215.

Hoagland, D.R. y Arnon, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular and California Agricultural Experiment Station*, 347: 32-33.

Kumar, G.D., Natarajan, N. y Nakkeeran, S. (2016). Antifungal activity of nanofungicide Trifloxystrobin 25%+ Tebuconazole 50% against *Macrophomina phaseolina*. *African Journal of Microbiology Research*, 10: 100-105.

Liu, R. y Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514: 131-139.

Liu, R., Zhang, H. y Lal, R. (2016). Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) Seed germination: Nanotoxicants or nanonutrients?. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227: 1-14.

Lin, D. y Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 42: 5580-5585.

McDaniel, B.K. y Binder, B.M. (2012). Ethylene receptor 1 (ETR1) is sufficient and has the predominant role in mediating inhibition of ethylene responses by silver in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Biological Chemistry*, 287: 26094-26103.

Mukherjee, A., Peralta-Videa, J.R. Bandyopadhyay, S. Rico, C.M., Zhao, L. y Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics*, 6: 132-138.

Naderi, M.R., y Danesh-Shahraki, D.A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5: 2229-2232.

Navarro, E., Baun, A., Behra, R., Hartmann, N.B., Filser, J., Miao, A.J. y Sigg, L. (2008). Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. *Ecotoxicology*, 17: 372-386.

Pandey, A.C., Sanjay, S.S. y Yadav, R.S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5: 488-497.

Panwar, J., Jain, N., Bhargaya, A., Akhtar, M.S. y 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.

Patel, N., Desai, P., Patel, N., Jha, A. y Gautam, H.K. (2014). Agronanotechnology for plant fungal disease management: A review. *International Journal Current Microbiology and Applied Sciences*, 3: 71-84.

Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.R. y Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35:905-927.

Rajiv, P., Rajeshwari, S. y Venckatesh, R. (2013). Bio-Fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Parthenium hysterophorus* L. and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogens. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 112: 384-387.

Rehman, H., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A. y Rengel, Z. (2012). Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*, 361: 203-226.

Sabir, S., Arshad, M. y Chaudhari, S.K. (2014). Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications. *The Scientific World Journal*, 1: 1-8.

Salama, H.M. (2012). Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *International Research Journal of Biotechnology*, 3: 190-197.

Sedghi, M., Hadi, M. y Toluie, S.G. (2013). Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals of West University of Timișoara, Ser. Biology*, 16: 73-78.

Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J.C. y Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17: 1-21.

Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M.G.H., Saradhi, P.P., Khanna, P.K. y Arora, S. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167: 2225-2233.

Shende, S., Ingle, A.P., Gade, A. y 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: 865-873.

Subramanian, K.S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M. y Rahale, C.S. (2015). Nanofertilizers for balanced crop nutrition. In: *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 69-80).

Shyla, K.K. y 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.

Stampoulis, D., Sinha, S.K. y White, J.C. (2009). Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental Science & technology*, 43: 9473-9479.

Tarafdar, J.C., Raliya, R., Mahawar, H. y Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3:257-262.

Yadav, A.S. y Srivastava, D.S. (2015). Application of nano-technology in weed management: A Review. *Research & Reviews: Journal of Crop Science and Technology*, 4: 21-23.

Zhao, L., Sun, Y., Hernandez, V.J., Servin, A.D. Hong, J., Niu, G., Peralta, V.J., Duarte, G.M. y Gardea, T.J. (2014). Influence of CeO₂ 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.

