

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuesta a la Aplicación de Nanopartículas de Manganeso (NPsMn_2O_3) del
Desarrollo de Planta, Asimilación de CO_2 y Rendimiento en Chile Poblano
(*Capsicum annuum L.*) Variedad San Luis

Por:

HERIBERTO REYES FERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuesta a la Aplicación de Nanopartículas de Manganeso (NPsMn₂O₃) del
Desarrollo de Planta, Asimilación de CO₂ y Rendimiento en Chile Poblano
(*Capsicum annuum* L.) Variedad San Luis

Por:

HERIBERTO REYES FERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Asesor Principal



Dr. Antonio Flores Naveda

Coasesor



M.C. Myrna Julieta Ayala Ortega

Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2018

AGRADECIMIENTOS

A DIOS. Por haberme dado la vida, las fuerzas, la voluntad, la paciencia y perseverancia necesaria para seguir adelante y lograr uno de mis sueños.

A mi familia. Que me han dado impulso en mi superación académica, y siempre han estado conmigo a cada momento, gracias por su motivación.

También le agradezco a mis amigos en especial a **Toñin, Oswaldo, Gustavo, Daniel, Erik, Alonso y a los Cuchis FC** que siempre estuvieron hay para ayudarme en cada momento y que gracias a ellos mi estancia aquí fue muy agradable.

A mi novia Lucero. Por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos.

A mi alma mater. Por abrirme sus puertas y hacer que me sintiera en casa, por todas esas alegrías y buenos momentos que pase en esta institución, por brindarme las herramientas necesarias para mi formación profesional. Por eso y por tantas cosas más **¡Buitre por siempre!**

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres. Por darme la oportunidad en este trabajo de investigación y brindarme su valioso tiempo, dedicación, paciencia y sus conocimientos para terminar con esta tesis que es la etapa final de mis estudios profesionales.

A la M.C. Myrna Julieta Ayala Ortega. Por su valioso tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Antonio Flores Naveda. Por su colaboración en la revisión del presente trabajo y por sus aportaciones hechas para la mejora de su estructura y complejidad del mismo.

DEDICATORIA

A DIOS por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

El presente trabajo se lo dedico con mucho amor y cariño a mis queridos padres, que gracias a sus consejos y regaños hicieron de mí la persona que ahora soy. A mi madre la **Sra. Ma Elia Fernández Pacheco** que fue la persona que se ha hecho responsable de mí desde que era pequeño y por brindarme su confianza. A mi padre **Heriberto Reyes Melchor** que ahorita se encuentra en el cielo, sé que tengo un ángel que me está cuidando y se siente orgulloso de su hijo, gracias a el supe cómo ser una persona madura y no rendirme ante las adversidades que se presentan en la vida.

A mis **hermanos Zeelene, Gonzalo y William** por sus palabras de aliento que día a día me motivaron para seguir adelante, muchas gracias por su compañía. **“Los quiero mucho”**

A mi novia Lucero. Por su palabras y confianza, por su amor y por nunca dejarme solo. A ti, que desde que llegaste a mi vida he pasado los mejores momentos a tu lado, gracias por sacarme una sonrisa con cada cosa que dices y haces. **“Eres una persona maravillosa”**

A mis amigos **Liborio, Canelo, Alonso, Piojo, Rochi, Tavi, Niño, Cotorrin:** sin duda grandes seres humanos con los que he pasado tantas aventuras.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS.....	4
1.1.1.	Objetivo general	4
1.1.2.	Objetivos Específicos	4
1.2.	HIPÓTESIS.....	4
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1.	Nanotecnología.....	5
2.2.	¿Qué son las nanopartículas?	6
2.3.	Aplicación de nanopartículas en la agricultura contra plagas y enfermedades	8
2.4.	Aplicación de nanopartícula en la nutrición.....	9
2.5.	Trabajos aplicando nanopartículas a plantas.....	11
2.5.1.	Efectos negativos	13
2.6.	Nanopartículas aplicadas a semillas.....	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1.	Material biológico.....	17
3.2.	Ubicación del sitio experimental	17
3.3.	Tratamientos (Cuadro 1).....	17
3.4.	Solución Nutritiva de acuerdo a Hoagland, eliminando el Mn (Cuadro 2). 18	
3.4.1.	Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.....	18
3.5.	Diseño experimental	19
3.6.	Variables evaluadas	19

3.6.1. Altura de planta (AP)	19
3.6.2. Diámetro de tallo (DT)	19
3.6.3. Tasa de asimilación de CO ₂ (Fotosíntesis).....	19
3.6.4. Número de frutos (N. FRUTOS)	20
3.6.5. Peso (PF) y longitud de fruto (LF)	20
3.6.6. Peso seco de raíz.....	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Respuesta fisiológica y agronómica a la aplicación de (NPsMn ₂ O ₃) de plantas de chile poblano	21
V. CONCLUSIONES	38
VI. LITERATURA CITADA.....	39
VII. ANEXOS.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos aplicados a macetas en invernadero.....	17
Cuadro 2. Solución de Hogland.	18
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile en el ensayo de invernadero con la aplicación de (NPsMn ₂ O ₃).	22
Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para la variable peso de raíz.....	23
Cuadro 5. Medias por concentración de variables agronómicas evaluadas en invernadero en plántulas de chile tratadas con NPsMn ₂ O ₃	24
Cuadro 6. Comparación de medias por fecha de evaluación de las variables agronómicas evaluadas en invernadero en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn ₂ O ₃)	26
Cuadro 7. Comparación de medias por fecha de evaluación para la variable número de frutos en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn ₂ O ₃).	27
Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables peso seco y longitud de fruto en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero con la aplicación de (NPsMn ₂ O ₃)	28
Cuadro 9. Comparación de medias de las variables peso y longitud de fruto en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn ₂ O ₃)	29
Cuadro 10. Comparación de medias por fecha de corte y evaluación para las variables peso y longitud de fruto en plantas de chile poblano tratadas con NPsMn ₂ O ₃	30
Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO ₂ , evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero con la aplicación de NPsMn ₂ O ₃	32

Cuadro 12. Comparación de medias por etapa para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂, evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃. 35

Cuadro 13. Comparación de medias por dosis para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂, evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con (NPsMn₂O₃). 37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tasa de asimilación de CO₂, evaluada en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃. 49

Anexo 2. Tasa de transpiración evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃. 49

Anexo 3. Longitud de fruto en diferente fecha de corte para plantas de chile poblano tratadas con NPsMn₂O₃. 50

RESUMEN

El presente trabajo se estableció en el área de invernaderos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, ubicada a 25°21'5" latitud N y 101°1'47" longitud W, con el objetivo de Identificar el efecto de la aplicación de NPs de Manganeso (NPsMn₂O₃) en el desarrollo de planta, en la tasa de asimilación de CO₂ y en la productividad, en el cultivo de chile poblano.

Semillas previamente imbibidas en NPsMn₂O₃ (0, 10, 20, 30, 40, 50 y 100 ppm), se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades. Posteriormente, se trasplantaron a maceta en donde se aplicó al sustrato NPsMn₂O₃ (0, 10, 20, 30, 40, 50 y 100 ppm), se determinó altura de planta, diámetro de tallo, número de frutos, peso de fruto, longitud de fruto y peso seco de raíz. Además, se usó un determinador portátil marca LI-COR 6400, para medir la tasa de asimilación de CO₂, CO₂ intercelular, transpiración y conductancia estomática. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 7, esto es, 2 etapas fenológicas y 7 concentraciones de NPsMn₂O₃.

En invernadero, el uso de NPsMn₂O₃ aplicadas al sustrato en forma de suspensión a concentraciones bajas (10 ppm), inhibieron el desarrollo de la planta, causando fitotoxicidad, lo cual se reflejó en un menor diámetro de tallo y altura de planta. En cuanto al número de frutos por corte, concentraciones altas (50 y 100 ppm) duplican el número de estos. Concentraciones altas de 50 y 100 ppm, inhiben el desarrollo del fruto, reflejándose en menor peso, mientras que concentraciones bajas (10 y 20 ppm) incrementan drásticamente el tamaño del fruto. Para la variable peso seco de raíz no se encontraron diferencias estadísticas pero si numéricas, siendo la concentración de 50 ppm donde se obtuvo mayor peso. Por otra parte, la aplicación de NPsMn₂O₃ tiene un efecto positivo en la tasa de asimilación de CO₂, sobre todo en la etapa vegetativa.

Palabras clave: Nanopartícula, Fotosíntesis, Transpiración, *Capsicum annuum*

I. INTRODUCCIÓN

La Oficina Nacional de Coordinación de la Nanotecnología (ONCN) de Estados Unidos, define la nanociencia (NC) como aquélla que "involucra la investigación y el descubrimiento de nuevas características y propiedades de materiales en la nanoescala, cuyo rango va de 1 a 100 nanómetros (nm)"; y la Nanotecnología (NT) como "la manera en que los descubrimientos son puestos a trabajar".

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 nanopromotores 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. Por esta razón en la actualidad, está siendo considerada parte de la nueva revolución tecnológica; ya que brinda grandes posibilidades de desarrollo a medida de que se asimila, recrea y difunde en la sociedad.

La nanotecnología (NT) es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación, manejo, operación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas a nano escala.

En la agricultura moderna sustentable la nanotecnología promete aportar soluciones usando nanopartículas (NPs); las cuales poseen tres mecanismos principales de acción los cuales son: generación de especies reactivas de oxígeno, liberación de iones, y acumulación o penetración de la membrana celular (Alvarado *et al.*, 2014 y Resham *et al.*, 2015)

Las nanopartículas (NPs) son agregados atómicos o moleculares que se pueden modificar drásticamente en sus propiedades físico-químicas en comparación con

el material a granel. Tienen una amplia variedad de aplicaciones en diversos campos, entre ellos el biomédico, biológico, óptico, electrónico, agricultura y en la tecnología de los alimentos.

La mayoría de las NPs tienen efectos positivos y negativos en los cultivos, la eficacia de aplicación se determina por su genotipo, composición química, tamaño, revestimiento superficial, reactividad y lo más importante, la dosis en la cual son eficaces los cuales dependen del tipo, fuente y tamaño de NPs.

En la agricultura se están utilizando materiales para el tratamiento de algunas enfermedades en plantas, destacando principalmente la elaboración de nanopesticidas 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; Grillo *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2014).

Con el rápido avance de la NT como la síntesis controlada del tamaño y morfología de los nanomateriales permiten dar solución a la absorción de macro y micronutrientes en las plantas, consiguiendo incrementar la producción de los alimentos. Las aplicaciones directas en la agricultura, incluyen principalmente la aplicación eficiente de nanofertilizantes foliares y nanopesticidas que proporcionan cantidades óptimas y reducen las pérdidas (Li *et al.*, 2016).

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, así como para el control de enfermedades de los cultivos.

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).

En este trabajo de investigación se estudió el efecto que tienen las NPs de óxido de manganeso (NPs Mn_2O_3), a diferentes concentraciones en plantas de chile poblano (*Capsicum annuum L.*), variedad San Luis.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Identificar el efecto de la aplicación de NPs de Manganeseo (NPsMn_2O_3) en el desarrollo de planta, en la tasa de asimilación de CO_2 y en la productividad, en el cultivo de chile poblano.

1.1.2. Objetivos Específicos

Evaluar el efecto de la aplicación de (NPsMn_2O_3) en variables agronómicas de plantas de chile poblano cultivado en invernadero.

Cuantificar la respuesta a la aplicación de suspensiones de (NPsMn_2O_3) en variables fisiológicas, altura de planta, diámetro de tallo y tasa de asimilación de CO_2 .

1.2. HIPÓTESIS

La aplicación de (NPsMn_2O_3) promueve procesos fisiológicos, mejorando el desarrollo de planta, la tasa de asimilación de CO_2 y la productividad, en el cultivo de chile poblano. Por lo tanto se incrementa el rendimiento.

La aplicación de (NPsMn_2O_3), no promueve procesos fisiológicos, ni mejora el desarrollo de planta, tasa de asimilación de CO_2 y productividad, en el cultivo de chile poblano.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Nanotecnología

La nanotecnología (NT) es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación, manejo, operación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas a nano escala. Esta tiene un gran potencial, ya que puede mejorar la calidad de vida a través de sus aplicaciones en diversos campos como lo son la agricultura y la tecnología de los alimentos esto a través de la utilización eficiente del agua, la protección contra insectos y enfermedades, mejoramiento de la eficiencia de los nutrientes, desarrollo de pesticidas de nueva generación, proporcionando nuevas herramientas para la biología molecular y celular, ya que ofrece la posibilidad de generar nanoproducidos como fertilizantes, plaguicidas, sensores y promotores de crecimiento de plantas (Buzea *et al.*, 2007; Walker y Bucher., 2009; Lira Saldívar *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2016; Servin y White, 2016; Grillo *et al.*, 2016; Nuruzzaman *et al.*, 2016; Yadollahi *et al.*, 2009). Así como los mecanismos de interacciones huésped-parasito a nivel molecular, la búsqueda de compuestos para la conservación y envasado de alimentos etc. (Mukhopadhyay, 2014; Vanderroost *et al.*, 2014).

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). En la agricultura moderna sustentable la nanotecnología promete aportar soluciones usando nanopartículas (NPs); las cuales poseen tres mecanismos principales de acción los cuales son: generación de especies reactivas de oxígeno, liberación de iones, y acumulación o penetración de la membrana celular (Alvarado *et al.*, 2014 y Resham *et al.*, 2015). La tendencia es formular productos con ingredientes activos de tamaño nanométrico, lo cual los hace más eficientes y de fácil disponibilidad, además de minimizar las pérdidas al aplicar el producto (Ruiz Torres *et al.*, 2016).

Cualquier material a escala nanométrica presenta nuevas propiedades que son diferentes de los materiales convencionales, debido a su pequeño tamaño y elevada relación superficie volumen, expresada en mayor reactividad química y energía superficial, con alta movilidad en el cuerpo de un organismo incluyendo la entrada celular (Sathiyarayanan y Nibiya, 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). Así como 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.

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).

2.2. ¿Qué son las nanopartículas?

Las nanopartículas (NPs) son agregados atómicos o moleculares con al menos una dimensión entre 1 y 100 nm (Ball, 2002; Roco, 2003), que se pueden modificar drásticamente en sus propiedades físico-químicas en comparación con

el material a granel (Nel *et al.*, 2006). Tienen una amplia variedad de aplicaciones en diversos campos, entre ellos el biomédico, biológico, óptico y electrónico (Ball, 2002; Karunaratne, 2007). Walker y Bucher (2009) ya avisaron su potencial en la agricultura y en la tecnología de los alimentos.

Las NPs están relacionadas con la reducción del impacto ecológico al requerirse menor cantidad de aplicaciones y agroinsumos en productos generados por esta tecnología (Lira-Saldivar *et al.*, 2016), se propone el empleo de nanomateriales como antagonistas de microorganismos fitopatógenos o como herramienta de diagnóstico para la detección de enfermedades (Sharon *et al.*, 2010; Yah y Simate *et al.*, 2015). En estudios recientes se ha demostrado que uno de los principales potenciales de las nanopartículas metálicas es su efecto antimicrobiano en patógenos de humanos y plantas siendo un factor importante su tamaño debido a que entre menor tamaño mayor es su efecto antimicrobial, siendo amigables con el ambiente reduciendo los riesgos de intoxicación para los seres vivos (Yamamoto, 2001; Betancourt *et al.*, 2014; Espinoza, 2014).

La mayoría de las NPs tienen efectos positivos y negativos en los cultivos, la eficacia de aplicación se determina por su genotipo, composición química, tamaño, revestimiento superficial, reactividad y lo más importante, la dosis en la cual son eficaces los cuales dependen del tipo, fuente y tamaño de NPs, esta tienen mucha variación con respecto a las especie, etapa de crecimiento, condiciones de desarrollo, método de aplicación y estos a su vez afectan los procesos fisiológicos, morfológicos, bioquímicos y moleculares en las plantas (Muhammad *et al.*, 2016; Khodakovskaya *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; Hatami *et al.*, 2014; Mingyu *et al.*, 2007). 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; Demidchik, 2015; Srilatha, 2011). Bajo este punto de vista, es recomendable no solo evaluar la respuesta de diversos genotipos a la aplicación de NPs durante la germinación,

sino ir más allá para conocer la capacidad de estos a etapas subsecuentes (Buu *et al.*, 2014).

Las NPs debido a sus características físico-químicas, son algunos de los posibles candidatos para modular el estado redox y el cambio de la germinación de las semillas, capacidad de absorción, degradación de reservas, división celular, el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las plantas (Mukherjee y Mahapatra, 2009; Chinnamuthu y Boopathi, 2009 ; Mahmoodzadeh *et al.*, 2013).

2.3. Aplicación de nanopartículas en la agricultura contra plagas y enfermedades

En la actualidad, la nanotecnología y todas sus áreas de aplicación incluyendo la de los alimentos agrícolas, surgen como estrategias inteligentes para resolver problemas concretos, a través del diseño de nuevos materiales que responden a necesidades especiales en diferentes campos de acción, entre los que se considera la conservación de productos hortícolas (Boyás *et al.*, 2015). Uno de los problemas principales en la conservación de las frutas y hortalizas es la presencia de microorganismos patógenos que ocasionan graves enfermedades al consumidor (bacterias patógenas) y los deterioradores (hongos y bacterias) que causan grandes pérdidas económicas (Bautista-Baños, 2004; Bautista-Baños, 2015).

En la agricultura se están utilizando materiales para el tratamiento de algunas enfermedades en plantas, destacando principalmente la elaboración de nanopesticidas 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; Grillo *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2014), así como para hacer más eficiente el uso y aplicaciones de los agroquímicos (Nuruzzaman *et al.*, 2016; Srilatha, 2011), nanosensores que permiten detectar la presencia de plagas y enfermedades de cultivos (Fraceto *et al.*, 2016 ; Vimala *et al.*, 2016; Krishnaraj *et*

al., 2016; Sharon *et al.*, 2010), empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacterial o fúngico al estar envasados (Vanderroost *et al.*, 2014), producción agentes antimicrobianos (Yah y Simate *et al.*, 2015 ; Yamamoto, 2001; Betancourt *et al.*, 2014). Las NPs tienen un potencial de aplicación como agentes bacteriostáticos y pueden usarse para controlar la propagación e infección de diversos patógenos como *Penicillium expansum*, *Bortrytis cinerea*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium culmorum* (Raskar y Laware, 2014; Prapatsorn *et al.*, 2011).

Estudios muestran que las NPs de Ag, ZnO y CuO reducen la presencia de enfermedades de los cultivos directamente, a través de la actividad antimicrobiana (Prasad, 2014). Las NPs de Ag muestran una fuerte actividad inhibidora de los microorganismos y como tal, hay una investigación significativa sobre las aplicaciones para manejo de fitopatógenos (Ocsoy *et al.*, 2013). Aunque el mecanismo de la toxicidad las NPs Ag no se conoce completamente, la actividad antimicrobiana parece estar impulsada por iones de Ag⁺, con algún efecto adicional, por ejemplo, se sabe que los iones Ag⁺ se unen a proteínas que contienen cisteína en las membranas plasmáticas, causando tanto daño fisiológico como bioquímico que compromete integridad de la membrana. La penetración subsiguiente de Ag⁺ en el citoplasma causa la inactivación de sistemas enzimáticos críticos y la muerte celular (Ocsoy *et al.*, 2013).

2.4. Aplicación de nanopartícula en la nutrición

Con el rápido avance de la NT como la síntesis controlada del tamaño y morfología de los nanomateriales permiten dar solución a la absorción de macro y micronutrientes en las plantas, consiguiendo incrementar la producción de los alimentos. Las aplicaciones directas en la agricultura, incluyen principalmente la aplicación eficiente de nanofertilizantes foliares y nanopesticidas que proporcionan cantidades óptimas y reducen las pérdidas (Li *et al.*, 2016).

Un nano fertilizante se refiere a un producto que libera nutrientes a los cultivos de tres formas distintas. Mediante la encapsulación del nutriente en nanomateriales como nanotubos o nano compuestos, cubierto con una delgada capa protectora, o que estos sean liberados como partículas o emulsiones a nanoescala (DeRosa *et al.*, 2010). De esta forma, el uso de fertilizantes basados en nanopartículas permite una liberación gradual de los nutrientes de acuerdo a la necesidad del cultivo y previene la pérdida prematura de los mismos (Chhowalla, 2017).

Actualmente se están desarrollando una variedad de nanopartículas metálicas tales como el hierro (Fe), el cobre (Cu), la plata (Ag), el zinc (Zn) y los polímeros a base de óxido metálico, incluyendo óxido de zinc (ZnO) y dióxido de titanio (TiO₂), para usos agrícolas, ya que tienen el potencial de ser utilizadas como nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015; Naderi y Danesh-Shahraki, 2013). Entre los diversos metales, las NPs de ZnO desempeña un papel vital en los procesos bioquímicos, fisiológicos y anatómicos, relacionados con el crecimiento de plantas (Zafar *et al.*, 2016). El zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento y la mejora de plantas y seres humanos, desempeña la posición más importante en varias rutas metabólicas y es esencial para activar varias enzimas como el superóxido dismutasa, triptófano sintetasa y deshidrogenasas (Narendhran *et al.*, 2016).

En este sentido la nanotecnología (NT) es capaz de modificar las propiedades fisicoquímicas de los materiales, lo que incrementa de manera exponencial su área de contacto, brindándoles a éstos nanomateriales, una mayor capacidad de reacción (Vajtai, 2013) y para el caso específico del cobre como micronutriente; la composición de sus partículas en escala nanométrica (NPs) le permitirá ingresar a la célula de manera directa, sin tener que seguir la ruta tradicional de absorción-translocación (Siddiqui, 2015; Kole *et al.*, 2016).

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).

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).

2.5. Trabajos aplicando nanopartículas a plantas

Las NPs de cualquier tipo pueden aplicarse de manera foliar como aspersión o nebulización, o también a las raíces de manera manual o mediante el sistema de fertiriego. Los efectos son muy variados y pueden verse reflejados en la fisiología de las plantas y semillas como en la germinación, elongación de plántulas, crecimiento vegetativo, en fotosíntesis, intercambio gaseoso incluyendo la apertura estomática y transpiración, mayor acumulación de biomasa, debido a una mayor actividad fotosintética, así como en rendimiento y calidad de la cosecha (Adhikari *et al.*, 2016; López-Moreno *et al.*, 2016; Jayarambabu y Siva, 2015; Durairaj *et al.*, 2015; Razzaq *et al.*, 2015; Siddiqui *et al.*, 2014).

Los efectos de las NPs en los cultivos tienen mucha variación con respecto a las especie, etapa de crecimiento, condiciones de desarrollo, método de aplicación, dosis aplicada e intervalos de aplicación (Muhammad *et al.*, 2016). Por ejemplo, lo expuesto por Roghayyeh *et al.* (2010), quien indica que las NPsAg aumentaron la cantidad de ascorbato y clorofila en las hojas de espárragos (*Asparagus officinalis*); las NPsFe aumentaron la cantidad de biomasa en soya (*Glycine max*) y las NPs de sílice aumentaron la germinación de las semillas, así como el

crecimiento de raíces y brotes laterales, la tasa fotosintética y la biomasa seca en plántulas de maíz cultivadas en campo abierto (Suriyaprabha *et al.*, 2012).

La aplicación foliar de 1.5 y 10 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 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 (*Gossypium hirsutum*), así como de biomasa seca y contenido de clorofila (Rezaei y Abbasi, 2014).

Algunas NPs como las de CuO y ZnO, muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA) el cual promueve la elongación y división celular, incrementando la velocidad de crecimiento en las plantas, así como del ácido salicílico, esto hace que se facilite o incremente la acción fitoestimulante de las NPs (Wang *et al.*, 2015; Shyla y Natarajan, 2014; Engates y Shipley, 2011; Wang *et al.*, 2012).

En un estudio para investigar los efectos de NPs ZnO y CeO₂ en concentraciones de 400 ppm en plantas de pepino (*Cucumis sativus*), se detectó mayor contenido de almidón y alteración del contenido de carbohidratos de los frutos (Zhao *et al.*, 2014).

Otras NPs como las de óxido de titanio (NPsTiO₂) aplicadas al follaje, causan 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 (Rezaei *et al.*, 2015; Capaldi *et al.*, 2015).

2.5.1. Efectos negativos

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; Vannini *et al.*, 2013; Hajipour *et al.*, 2012).

La fitotoxicidad por materiales extraños es importante en las plantas, debido a que continuamente están sometidas a la aplicación de fertilizantes y pesticidas en exceso. Las NPs por su tamaño pueden causar acumulación y fitotoxicidad e inducir daños al nivel celular y molecular. Lin y Xing (2008) señalan que la aplicación de NPsZnO en zacate rye grass (*Lolium perenne*) redujo significativamente la biomasa; las puntas de las raíces se encogieron y las células corticales y epidermales se colapsaron, indicando que las NPs causaron daños.

Sin embargo, en concentraciones bajas las NPs 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. Además estas NPs pueden mejorar la eficiencia de intercambio de electrones a nivel celular en las plantas, lo que podría reducir la formación de especies reactivas de oxígeno (Dimkpa *et al.*, 2015).

2.6. Nanopartículas aplicadas a semillas

Las NPs debido a sus características físico-químicas, son algunos de los posibles candidatos para modular el estado redox y el cambio de la germinación de las semillas, el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las plantas (Mukherjee y Mahapatra, 2009). La aplicación de NPs estimula la germinación de la mayoría de las especies, sin embargo esta respuesta depende de la concentración y el genotipo (Hatami *et al.*, 2014; Hashemi y Mousa, 2013; Ulla y Arshad, 2014; Khodakovskaya *et al.* 2009). Por lo tanto existe la posibilidad de aplicar una amplia gama de NPs para mejorar las características fisiológicas y morfológicas de los cultivos (Mingyu *et al.*, 2007).

El efecto de las NPs comienza a manifestarse desde la germinación de las semillas, reflejándose en una mayor emergencia y uniformidad que se observa en la germinación final, debido principalmente a la penetración de nanomateriales en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo. En estudios realizados por Mahmoodzadeh *et al.* (2012), se evidencian los efectos de titanio a nanoescala con partículas de TiO_2 , reportando una promoción de la germinación del 75 % con la aplicación de NPs (20 nm de tamaño de partícula a 2000 mg L⁻¹ de concentración).

Feizi *et al.* (2012) reportaron mejor porcentaje de germinación en trigo (*Triticum aestivum* L.) tratado con NPs de óxido de titanio (TiO_2), comparado con el TiO_2 a granel. El tratamiento de NPs de TiO_2 , en la concentración adecuada, aceleró el proceso de germinación en semillas de espinaca, además, las semillas tratadas con estas NPs presentaron plantas con mayor peso seco, tasa fotosintética más alta, y un aumento en la formación de clorofila, además se observó que menor tamaño de partícula, mejor efecto tiene en la germinación (Zheng *et al.*, 2005).

Abbasi *et al.* (2016) indican que las NPs de plata y sílice pueden tener un efecto positivo sobre la germinación de semillas y rasgos iniciales de crecimiento. La introducción de NPs en la germinación de semillas y crecimiento de plántulas

podría tener un impacto significativo y por lo tanto, se puede utilizar para aplicaciones agrícolas para un mejor crecimiento y rendimiento. Es importante considerar que los pre-tratamientos con NPs en semillas se apliquen antes de la siembra, para mejorar la germinación y generar un fortalecimiento efectivo en plántulas. En este sentido, Azimi *et al.* (2016) señalan que la aplicación de SiO₂, acelera el establecimiento temprano de las plántulas, que a su vez mejora el crecimiento de las plantas y la acumulación de materia seca.

Krishna y Natarajan (2014) indican que las NPs de Zinc (ZnO), plata (Ag) y dióxido de titanio (TiO₂) mejoran la velocidad de germinación en semillas de cacahuate. Los efectos beneficiosos de las NPs podrían atribuirse a una mayor producción de enzimas responsables de las reacciones metabólicas. Por otra parte, podrían incrementar los niveles de ácido indolacético (AIA), en las raíces o brotes, que a su vez pueden incrementar el vigor de las semillas y por ende el crecimiento de plántulas.

Anusuya y Nibiya (2016) mencionan que la aplicación NPs conteniendo el biopolímero quitosan más plata (Ag-CS), causaron que las NPs tuvieran un efecto promotor del crecimiento en semillas de garbanzo, encontrando plántulas con mayor longitud de plúmula y de radícula, y mayor acumulación de peso seco, estos parámetros son considerados indicadores de vigor.

De acuerdo con Wang *et al.* (2016) las plantas sometidas a altas concentraciones de NPs sufren pérdida en la capacidad de la germinación, reducción en la tasa relativa de crecimiento, menor viabilidad del polen, modifica la expresión de genes y altera la generación de especies reactivas de oxígeno. Andersen *et al.* (2016) mencionan que la aplicación de NPs tiene diferentes efectos importantes sobre la planta, la germinación y el crecimiento temprano de la raíz pueden considerarse parámetros de evaluación para los efectos potenciales a la alta exposición de NPs. Raskar y Laware (2014) explican que las semillas sometidas a bajas concentraciones de NPs pueden mejorar la germinación, sin embargo, a concentraciones más altas el porcentaje de germinación final puede disminuir considerablemente.

En contraste (Saeid y Hojjat, 2016), mencionan que la aplicación de NPs de plata no influyó sobre la germinación en semillas de genotipo de lentejas, aunque la interacción de la semilla con las NPs disparó el crecimiento de la longitud de la raíz y la acumulación de materia seca. Por lo tanto, el efecto de las NPs en semillas y plantas puede ser positivo o negativo. Una preocupación para la aplicación de nanomateriales en la germinación de las semillas es su fitotoxicidad (Monica y Cremonini, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material biológico

Se utilizó semillas de chile (*Capsicum annuum L.*) variedad San Luis, proporcionada por el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se sembró en charola y posteriormente se trasplantó a maceta.

3.2. Ubicación del sitio experimental

El trabajo se estableció en el área de invernaderos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, ubicada a 25°21'5" latitud N y 101°1'47" longitud W. El trasplante se realizó en macetas de plástico de alto calibre con sustrato compuesto por perlita y vermiculita (2:1).

3.3. Tratamientos (Cuadro 1).

Las aplicaciones de las (NPsMn₂O₃) se hicieron los días lunes y viernes. Éstas fueron en el riego directamente a la raíz con un vaso de precipitado, a cada planta se le proporcionaron 100 ml.

Cuadro 1. Tratamientos aplicados a macetas en invernadero.

Tratamiento	NPs de Mn ₂ O ₃ (ml)
T1 (Testigo)	0
T2 (10 ppm)	20
T3 (20 ppm)	40
T4 (30 ppm)	60
T5 (40 ppm)	80
T6 (50 ppm)	100
T7 (100 ppm)	200

Ppm=partes por millón; Mn= Manganeseo; ml= mililitros.

3.4. Solución Nutritiva de acuerdo a Hoagland, eliminando el Mn (Cuadro 2).

Se irrigó con solución nutritiva “Hoagland”, la cual se suministró en una cantidad de 100 mL/planta diariamente, excepto los días en que se aplicaba la suspensión con nanopartículas (lunes y viernes). La solución Hoagland usada en los tratamientos no incluyó Mn, el cual fue el elemento a evaluar en este trabajo.

Cuadro 2. Solución de Hogland.

Macronutrientes	M	g/L	mL/L
NH ₄ H ₂ PO ₄	1	115	1
KNO ₃	1	101	6
Ca (NO ₃) * 4H ₂ O	1	236	4
Mg SO ₄ *7H ₂ O	1	246	2
Micronutrientes			
H ₃ BO ₃		2.86	
Zn SO ₄ * 7H ₂ O		0.22	1
Cu SO ₄ * 5H ₂ O		0.08	
H ₂ Mo O ₄ * H ₂ O		0.02	

M= Molaridad (gramos de sal por litro de solución); ppm= partes por millón (número de partes de la sal en un millón de partes de solución).

3.4.1. Composición de soluciones madre para preparar Hoagland.

- Se pesó 118 g de CaNO₃, y se aforó a 500 ml con agua destilada.
- Se pesó 50.5 g de KNO₃, y se aforó a 500 ml de agua destilada.
- Se pesó 123.25 g de Mg SO₄, y se aforó a 500 ml de agua destilada.
- Se pesó 68 g de K₂HPO₄, y se aforó a 500 ml de agua destilada.
- Se pesó 1.2 g de Quelato de Fe (FeSO₄+Na₂EDTA) y se aforó a 500 ml de agua destilada.

También se preparó una solución con micronutrientes que incluyó: 0.715 g de H₃BO₃, 0.55 g de ZnSO₄, 0.220 g de CuSO₄ y 0.225 g de H₂MoO₄.

3.5. Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 7, esto es, 2 etapas fenológicas y 7 tratamientos (Cuadro 1), con los datos obtenidos, se realizó análisis de varianza y pruebas de rango múltiple Tukey ($P \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el paquete estadístico SAS Institute (2004).

Modelo estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + e_{ijk}.$$

En donde:

μ = Media general

α_i = Efecto del i -ésimo nivel del factor A (Etapa fenológica)

β_j = Efecto del j -ésimo nivel del factor B (Concentración de NPsMn_2O_3)

$\alpha\beta_{ij}$ = Efecto de la interacción entre el factor α β_j

e_{ijk} = Componente del error aleatorio.

3.6. Variables evaluadas

3.6.1. Altura de planta (AP)

Se determinó una vez por semana (viernes), se midió la distancia desde la superficie del sustrato hasta la última ramificación del tallo, y se expresó en centímetros (cm).

3.6.2. Diámetro de tallo (DT)

Se utilizó un Vernier y se midió en los primeros 10 cm del tallo a partir de la base, expresándose en milímetros (mm).

3.6.3. Tasa de asimilación de CO_2 (Fotosíntesis)

Se tomaron lecturas en etapa vegetativa y en etapa reproductiva, con un determinador portátil de asimilación de CO_2 marca LI-COR 6400 previamente

calibrado, el cual permite mediciones precisas de fotosíntesis e intercambio de CO₂, la lectura fue tomada una vez que el valor permaneció constante en la pantalla en un lapso de 5 segundos. Seleccionando seis plantas por cada tratamiento, de las cuales se eligió una hoja por cada repetición que tuviera una superficie foliar de 6 cm².

Variables determinadas

- Tasa de asimilación de CO₂ (**A**), expresado en $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- CO₂ intercelular (**Ci**) expresada en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol aire}^{-1}$.
- Transpiración (**E**) expresada en $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Conductancia estomática al H₂O (**gs**), expresada en $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Radiación fotosintéticamente activa (**PAR**), expresada en $\mu\text{mol luz m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Temperatura de hoja (**T**), expresada en °C.

3.6.4. Número de frutos (N. FRUTOS)

Se realizaron tres conteos, el primero el día 30-08-17, el segundo 15 días después (15-09-17, y el tercero 15 días después del segundo (30-09-17).

3.6.5. Peso (PF) y longitud de fruto (LF)

Estas variables se determinaron una vez cosechado el fruto. El primer corte se realizó el día 15 de octubre de 2017 y el segundo el día 01 de noviembre. Para determinar la variable PF se pesaron los chiles en una balanza analítica (AND modelo HR-200) y para la variable LF se midió con una regla de 30 cm.

3.6.6. Peso seco de raíz

Al final del estudio se evaluó el **peso seco de raíz**, se colocaron en bolsas de papel y se secaron en una estufa a 75°C durante 24 h, posteriormente se pesaron en una balanza analítica (AND modelo HR-200) y resultado se expresó en gramos por planta (g planta^{-1}).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Respuesta fisiológica y agronómica a la aplicación de (NPsMn₂O₃) de plantas de chile poblano

a) Variables agronómicas.

Diámetro de tallo y altura de planta

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 3), para variables agronómicas evaluadas en el ensayo de invernadero, indican que, en las variables altura de planta y diámetro de tallo se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), en lo que respecta a las fechas de evaluación y tratamientos aplicados, esto se debe a que en cuanto va pasando el tiempo (fecha), la planta va desarrollándose y en base a eso va incrementando su altura y su diámetro de tallo.

La interacción fecha de evaluación x tratamiento, no mostró diferencias estadísticas significativas en las variables AP y DT, esto se puede atribuir a que las diferentes concentraciones aplicadas al sustrato, en las diferentes fechas de evaluación, no afectaron el desarrollo de la planta.

En cuanto la variable N. FRUTOS por corte, se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), en lo que respecta a las fechas de evaluación y para la fuente de variación tratamientos aplicados, esto se debe a que en cuanto va pasando el tiempo (fecha de evaluación), la planta produce un mayor número de frutos.

La interacción fecha de evaluación x tratamiento, no mostró significancia en la variable número de frutos por corte, esto se puede atribuir a que las diferentes concentraciones aplicadas al sustrato, en las diferentes fechas de evaluación, no modificaron la formación y desarrollo de frutos.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables agronómicas evaluadas en plantas de chile en el ensayo de invernadero con la aplicación de (NPsMn₂O₃).

FV	GL	AP (cm)	DT (mm)	GL	N. FRUTOS
Fecha	8	2902.32 **	41.21 **	2	48.61 **
Trat	6	1515.39 **	9.10 **	6	21.70 **
Fecha*Trat	48	28.76 NS	0.19 NS	12	4.23 NS
Error	441	151.06	1.23	147	5.07
Total	503	4597.53	51.73	167	79.61
CV (%)		29.70	18.24		69.07

*= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); ** Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); Trat= tratamiento (ppm); FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; AP= Altura de planta; DT= Diámetro de tallo; N.FRUTOS= Número de frutos por corte; ppm= partes por millón; Error= Error Experimental; CV= Coeficiente de variación; NS= Diferencias no significativas.

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 4), para variables agronómicas evaluadas en el ensayo de invernadero, indican que, en la variable peso seco de raíz no se observaron diferencias significativas, esto se puede atribuir a que las diferentes concentraciones de NPsMnO₂ aplicadas al sustrato, no afectaron la elongación y desarrollo del tallo.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para la variable peso de raíz.

FV	GL	PESO SECO RAÍZ (g planta⁻¹)
Concentración	6	0.79 _{NS}
Error	42	0.78
Total	48	1.57
CV (%)		18.80

FV= Fuentes de Variación; GL= Grados de libertad; Error= Error experimental; CV= Coeficiente de variación; NS= Diferencias no significativas.

En la comparación de medias por tratamiento (Cuadro 5), se observó para la variable altura de planta, que, al irrigar el sustrato con suspensión de NPsMn₂O₃ a 50 ppm se obtuvo una mejor respuesta, sin embargo, se encuentra dentro del mismo grupo estadístico que 30, 40 y 100 ppm. El incremento con 30, 50 y 100 ppm con respecto al testigo fue de 10.20, 13.65 y 9.67 cm, respectivamente. Mientras que al reducir las concentraciones a 0, 10 y 20 ppm, las plantas mostraron un menor crecimiento, indicando que se presentó deficiencia de Mn a estas dosis.

Para la variable diámetro de tallo, se encontró que la concentración de 20 ppm mostró mejores resultados con 6.35 mm, sin embargo, estadísticamente igual al resto de los tratamientos, excepto a 10 ppm, que resultó ser menor. La diferencia obtenida entre 20 ppm y el testigo, fue de 0.01 mm. Sin embargo, al comparar el testigo con la concentración de 10 ppm, se observó una reducción de 1.00 mm, lo anterior indica que las NPsMn₂O₃ al aplicarse al sustrato en concentraciones bajas (10 ppm) inducen deficiencias, observándose menos desarrollo de planta, reflejándose en menor DT.

Para la variable N.FRUTOS, al irrigar con suspensión de NPsMn₂O₃ a 50 ppm y 100 ppm, se observó un incremento en el número de frutos por corte por planta,

en comparación con el testigo. Lo anterior indica que las NPsMn_2O_3 al aplicarse al sustrato en concentraciones de 50 ppm duplican el número de frutos en comparación con el testigo. Sin embargo, es estadísticamente igual a 10, 20, 30 ppm, respectivamente.

Para la variable peso seco de raíz no se encontraron diferencias estadísticas, pero si numéricas, siendo la concentración de 50 ppm, la de mayor peso con 5.16 g planta⁻¹.

Cuadro 5. Medias por concentración de variables agronómicas evaluadas en invernadero en plántulas de chile tratadas con NPsMn_2O_3 .

Concentración (ppm)	AP (cm)	DT (mm)	N.FRUTO	PESO RAÍZ (g planta ⁻¹)
0	34.20 d	6.34 a	2.12 b	4.81 a
10	37.39 cd	5.34 b	2.95 ab	4.58 a
20	40.00 cd	6.35 a	3.20 ab	5.15 a
30	44.30 ab	5.99 a	3.25 ab	4.38 a
40	41.99 abc	6.09 a	2.29 b	4.52 a
50	47.85 a	6.30 a	4.62 a	5.16 a
100	43.87 ab	6.18 a	4.37 a	4.38 a
Media	41.37	6.09	3.62	4.71
Tukey	6.06	0.54	1.94	1.46

Medias dentro de cada columna con la misma literal son significativamente iguales; ppm= partes por millón; AP=Altura de planta; DT= Diámetro de tallo; N.FRUTOS= Número de frutos.

Experimentando con plantas de frijol y maíz, Salama (2012) aplicó foliarmente dosis de 20, 40, 60, 80 y 100 ppm de nanopartículas de plata (NPsAg), las aplicaciones diarias con 15 ml de cada concentración durante 12 días, mostrando que bajas las concentraciones (20-60 ppm) tuvieron un efecto estimulante sobre el crecimiento de las plántulas, mientras que las concentraciones altas (>80 ppm)

indujeron un efecto fitotóxico. Adicionalmente observó que las concentraciones de 20 a 60 ppm incrementaron el diámetro de tallo, longitud de raíz, área foliar, índice de clorofila, concentración de carbohidratos y contenido de proteína en las plantas.

Sharma et al. (2012) reportan que las NPsAg promueven el crecimiento de plántulas de mostaza (*Brassica juncea*), en concentraciones de 25 y 50 ppm, reflejándose en mayor longitud de raíz, biomasa seca y altura.

En el estudio de Delfani et al. (2014), reportan que una aplicación foliar de 500 mg L⁻¹ de NPsFe a plantas de chícharo (*Vigna sinensis*), aumentó significativamente el número de vainas por planta (47%), número de semillas (7%), contenido de Fe en las hojas (34%) y el contenido de clorofila (10%), en comparación con valores de las plantas control.

En cuanto a los resultados obtenidos en la comparación de medias por fechas de evaluación de las variables AP y DT (Cuadro 6), se observó que a medida en que la planta iba desarrollándose, su diámetro y altura también estuvieron en constante crecimiento, es por eso que en las mediciones que se hicieron, la literal **a** corresponde a la última medición realizada en este trabajo y presenta el valor más alto.

Para la variable (AP), igualmente se observó que al transcurrir el tiempo se incrementó, presentando valores estadísticamente diferentes.

Se ha reportado que las NPs metálicas de manganeso (NPsMn₂O₃) son una mejor fuente de micronutrientes que las sales tradicionales como el MnSO₄ disponible en el mercado (Pradhan et al., 2013). Estos investigadores señalan que las NPsMn₂O₃ incrementan el crecimiento de leguminosas (*Vigna radiata*) y observaron también que las plantas incrementaron su actividad fotosintética. La aplicación de NPsMn₂O₃ en 0.05 mg L⁻¹ aumentó el crecimiento de las plantas, respecto al tratamiento control (sin Mn). También reportaron un incremento de la longitud de la raíz (52%), longitud del tallo (38%), número de raíces (71%), biomasa fresca (38%) y biomasa seca (100%).

Cuadro 6. Comparación de medias por fecha de evaluación de las variables agronómicas evaluadas en invernadero en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn₂O₃)

FECHA	AP (cm)	DT (mm)
Agosto 11	25.78 d	4.41 d
Agosto 18	34.21 c	5.03 d
Agosto 26	40.17 bc	6.02 c
Sept 02	41.65 ab	6.14 c
Sept 08	44.41 ab	6.36 abc
Sept 15	45.25 ab	6.20 b c
Sept 22	46.47 ab	6.82 a b
Sept 29	46.82 ab	6.83 a b
Oct 06	47.58 a	6.96 a
Media	41.37	6.09
Tukey	7.24	0.65

AP= Altura de Planta; DT= Diámetro de Tallo; Sept= Septiembre; Oct= Octubre; Medias con la misma literal son significativamente iguales.

En cuanto a los resultados obtenidos en la comparación de medias por fechas de medición para la variable N.FRUTOS por fecha de corte (Cuadro 7), se observó lo esperado, esto es, que a medida en que la planta va desarrollándose, esta produce un mayor número frutos, es por eso que en los conteos que se hicieron, la literal a, corresponde a la última medición y presenta el valor más alto.

El zinc como nanofertilizante en dosis de 10 mg L⁻¹ ha promovido mayor crecimiento en plantas de mijo (*Pennisetum americanum*), así como mayor producción de biomasa seca, longitud de raíz, contenido de clorofila y rendimiento de grano (Tarafdar *et al.*, 2014).

Cuadro 7. Comparación de medias por fecha de evaluación para la variable número de frutos en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn₂O₃).

Fecha	N. DE FRUTOS
Agosto 30	2.42 b
Sept 15	3.08 b
Sept 30	4.26 a
Media	3.26
Tukey	1.00

N. FRUTOS= Número de Frutos por corte; Sept= Septiembre; Medias con la misma literal son significativamente iguales.

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 8), para variables agronómicas evaluadas en el ensayo de invernadero, indican que, en las variables peso y longitud de fruto se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$), en lo que respecta a las fechas de medición y tratamientos aplicados, esto se debe a que en cuanto va pasando el tiempo (fecha de medición), los frutos van creciendo y en base a eso su peso va incrementando.

La interacción fecha de medición x tratamiento, no mostró diferencias significativas para la variable peso de fruto, esto se puede atribuir a que las diferentes concentraciones aplicadas al sustrato, en las diferentes fechas de evaluación, no modificaron su expresión.

La interacción fecha de medición x tratamiento, para la variable longitud de fruto mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables peso seco y longitud de fruto en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero con la aplicación de (NPsMn₂O₃)

FV	GL	PESO FRUTO (g)	LONGITUD FRUTO (cm)
Fecha	1	21076.60**	739.08**
Trat	6	460.30**	18.72**
Fecha*Trat	6	116.41 _{NS}	7.43*
Error	182	73.31	2.90
CV (%)		28.64	25.70

*= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); ** Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); NS= Diferencias no significativas; Trat= tratamiento (ppm); FV= Fuentes de variación; GL= Grados de libertad; ppm= partes por millón; Error= Error experimental; CV= Coeficiente de variación.

En la comparación de medias por tratamiento (Cuadro 9), se observó que para la variable peso de fruto, la concentración de 40 ppm fue la que mostró mejores resultados con 40.15 g, sin embargo, es estadísticamente igual al testigo (34.61 g). La diferencia que se obtuvo entre la concentración 40 ppm (NPsMn₂O₃) y el testigo es de 5.54 g. No obstante, al comparar el testigo con las concentraciones de 30, 50 y 100 ppm, se observó una reducción de 10.94, 11.06 y 5.19 g, respectivamente. Lo anterior indica que las (NPsMn₂O₃) al aplicarse al sustrato en concentraciones de 30, 50 y 100 ppm, inhiben el desarrollo del fruto, reflejándose en menor peso.

Por otra parte, para la variable longitud de fruto, al aplicar al sustrato una concentración de 30, 40, 50 y 100 ppm, se obtuvo una respuesta estadísticamente igual al testigo. Mientras que al disminuir las concentraciones a 10 y 20 ppm, los frutos mostraron una mayor longitud. Para esta variable (longitud de fruto), se observó que al aplicar concentraciones de 10 y 20 ppm se incrementó drásticamente el crecimiento en comparación con el testigo en 1.63 y 1.96 cm, respectivamente.

Las NPs debido a sus características físico-químicas, son algunos de los posibles candidatos para modular el estado redox y el cambio de la germinación de las semillas, el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las plantas (Mukherjee y Mahapatra, 2009). Trabajos desarrollados en diversas especies de plantas confirman que las NPsZnO promueven el crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2014). Como ejemplo se puede citar el estudio realizado por Prasad *et al.* (2012), quienes indican que en semillas de cacahuete una concentración de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO promueve la elongación de raíz y tallo.

Algunos estudios señalan que concentraciones elevadas (1000 mg L⁻¹) causan fitotoxicidad e inhibición de la germinación (Kyung-Seok y Kong, 2014; Zhang *et al.*, 2015); mientras que dosis bajas (< 50 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.

Cuadro 9. Comparación de medias de las variables peso y longitud de fruto en plantas de chile poblano tratadas con (NPsMn₂O₃)

CONCENTRACIÓN (ppm)	PESO FRUTO (g)	LONGITUD FRUTO (cm)
0	34.61 ab	6.05 c
10	35.95 ab	7.68 ab
20	32.72 b	8.01 a
30	23.67 c	5.83 c
40	40.15 a	6.70 bc
50	23.55 c	5.89 c
100	29.42 bc	6.56 bc
Media	29.89	6.63
Tukey	7.16	1.29

Ppm= partes por millón; g=gramos; cm=centímetros; Medias con la misma literal son significativamente iguales.

En cuanto a los resultados obtenidos en la comparación de medias por fechas de medición de las variables peso y longitud de fruto (Cuadro 10), se observó que al transcurrir el tiempo disminuyó el peso y la longitud casi en un 50 %, presentando valores estadísticamente diferentes, siendo la fecha uno la de mayor longitud y peso.

Cuadro 10. Comparación de medias por fecha de corte y evaluación para las variables peso y longitud de fruto en plantas de chile poblano tratadas con NPsMn₂O₃.

FECHA	PESO FRUTO (g)	LONGITUD FRUTO (cm)
Oct15	43.29 a	9.20 a
Oct29	20.62 b	5.19 b
Media	28.89	6.53
Tukey	2.46	0.45

Oct=Octubre; gr=gramos; cm=centímetros; Medias con la misma literal son significativamente iguales.

b) Medición de la tasa de asimilación de CO₂ (fotosíntesis).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 11), las variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂ indican que en ambas etapas hubo diferencias altamente significativas en las variables, A (Fotosíntesis), gs (Conductancia estomática) y E (Transpiración), mientras C_i (CO₂ intercelular) mostró diferencias significativas, manifestando que la respuesta de las variables asociadas con la fotosíntesis tiene un comportamiento que varía con las etapas de desarrollo de la planta.

Por otra parte, en la fuente de variación dosis de NPsMn₂O₃, se encontraron diferencias altamente significativas (P≤0.01) en la variable A (Tasa de

asimilación de CO₂) y C_i (CO₂ intercelular), y diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la variable g_s (Conductancia estomática).

En la interacción Etapa*dosis solo hubo diferencias significativas en las variables C_i (CO₂ intercelular) y E (Transpiración) al ($P \leq 0.05$). Los resultados indican que los tratamientos evaluados modifican la capacidad del mesófilo para fijar CO₂.

La capacidad fotosintética de una planta tiene relación con la cantidad de CO₂ fijado, que dará como consecuencia la síntesis de carbohidratos que serán utilizados por la planta para su desarrollo, el resto lo almacenan en la diferentes estructuras como raíces o frutos para ser utilizados en momentos críticos donde no sea posible realizar completamente la fotosíntesis. Estos de carbohidratos que sintetizan las plantas son utilizados para alimentar a las especies heterótrofas que no son capaces de elaborar su propio alimento; por lo tanto, cuando más fotosíntesis realiza una planta, más carbono estará fijando para convertirlas en biomoléculas, de donde los organismos heterótrofos extraen la energía necesaria para poder vivir (Ramesh, 2003).

Las plantas se enfrentan al compromiso de obtener CO₂ para mantener la fotosíntesis. A través de los estomas se lleva a cabo el intercambio más importante de H₂O y CO₂, jugando la apertura estomática un papel crucial tanto en la transpiración como en la fotosíntesis foliar (Taiz y Zeiger, 2006).

Ya se han realizado trabajos donde se evalúen variables fisiológicas, un ejemplo es en el que se aplicó NPsTiO₂ donde observaron mejora de la actividad fotosintética, conductancia estomática y la transpiración en plantas de tomate (Qi *et al.*, 2013).

Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂, evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero con la aplicación de NPsMn₂O₃.

FV	GL	A ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol aire}^{-1}$)	E ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Etapa	1	36.96**	0.101**	2153.25*	221.76**
Dosis	6	1.96**	0.007*	1211.90**	1.69 _{NS}
Etapa*Dosis	6	0.32 _{NS}	0.004 _{NS}	1054.43*	5.25*
Error	66	0.57	0.003	374.61	1.76
CV (%)		11.84	31.15	6.46	21.40

**Altamente significativo al 0.01% de probabilidad; *Significativo al 0.05% de probabilidad.

FV= Fuente de variación; GL= Grados libertad; A= Tasa de asimilación de CO₂; g_s= Conductancia estomática; C_i= CO₂ intercelular; E= Transpiración

En la comparación de medias por etapa (Cuadro 12), muestra que en la etapa vegetativa la planta tuvo mayor tasa de asimilación de CO₂, así como conductancia estomática, CO₂ intercelular y tasa de transpiración.

El mesófilo es el lugar donde la planta absorbe la mayor parte del CO₂ y los espacios intercelulares permiten la circulación de aire, indispensable para un buen intercambio de gases para fotosíntesis, transpiración y respiración; también es responsable de almacenar la energía y nutrientes aunque pueden ser enviados a otro punto en la planta donde se necesitan; así mismo es un mecanismo de acumulación de CO₂ con el objetivo de disponer con reservas que puedan satisfacer la eficiencia de asimilación de la RUBISCO (enzima que reduce el CO₂) de forma suficiente y constante (Mediavilla y Escudero, 2008). La tasa de asimilación neta de CO₂ es una medida de la eficiencia del follaje, que es la principal fuente de fotoasimilados para la producción de materia seca. Este índice registra la velocidad de la fotosíntesis neta en un lapso de tiempo.

Con relación a la g_s (conductancia estomática) se indica una mayor apertura estomática en la medición realizada en la etapa vegetativa con 0.21 mol H₂O m⁻² s⁻¹, lo cual se refleja en un valor mayor de C_i (305.65 μmol CO₂ mol aire⁻¹), sin modificarse significativamente la tasa de transpiración (E).

El C_i es importante porque indica la eficiencia del mesófilo, esto es, si el C_i está siendo fijado, se espera un menor valor, sin embargo, si la g_s es alta, permite la entrada de CO₂ al espacio intercelular, manteniendo siempre una concentración de C_i, para que sea asimilado.

En la etapa vegetativa, se observó una tasa alta de transpiración (E). Lo anterior indica que existe una pérdida significativa de H₂O, debido a la apertura de estomas, cuyo ajuste estomático tiene como objetivo regular la temperatura de la planta debido al aumento de irradiación.

Las NPs de cualquier tipo pueden aplicarse de manera foliar como aspersión o nebulización, o también a las raíces de manera manual o mediante el sistema de

fertiriego. Los efectos son muy variados y pueden verse reflejados en la fisiología de las plantas y semillas como en la germinación, elongación de plántulas, crecimiento vegetativo, en fotosíntesis, intercambio gaseoso incluyendo la apertura estomática y transpiración, así como en rendimiento y calidad de la cosecha (Adhikari *et al.*, 2016; López-Moreno *et al.*, 2016).

Cuadro 12. Comparación de medias por etapa para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂, evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃.

Etapa	A ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol aire}^{-1}$)	E ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Vegetativa	7.10 a	0.21 a	305.65 a	7.97 a
Reproductiva	5.78 b	0.14 b	294.85 b	4.60 b
Media	6.41	0.17	299.98	6.20
Tukey	0.33	0.02	8.65	5.59

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

A= Tasa de asimilación de CO₂; g_s= Conductancia estomática; C_i= CO₂ intercelular; E= Transpiración

De acuerdo al (Cuadro 13) de comparación de medias por dosis, indica que al aplicar NPsMnO₂ se incrementa la activación de la enzima RUBISCO (Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa), la cual participa en la catálisis de dos procesos, la fijación de CO₂ a una forma orgánica y la fotorespiración, en la que actúa como oxigenasa, siendo más eficiente en la concentración de 100 ppm, ya que se presenta un mesófilo con una alta tasa de asimilación de CO₂ (A) con 6.93 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, superando a las demás concentraciones.

La variable g_s en dosis de 40 ppm tuvo mayor valor superando el resto de las concentraciones.

El C_i indica que a dosis de 20 y 40 ppm se obtuvo mayor aprovechamiento del CO₂ intercelular. La variable E no presentó diferencias estadísticas, pero si numéricas, las cuales indican que a 40 ppm hay mayor tasa de transpiración con 6.68 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo cual se pudo deber a una mayor g_s .

La posibilidad de incrementar el rendimiento de muchos cultivos con un aumento en la tasa fotosintética ha sido considerada frecuentemente debido a que la biomasa seca producida por la planta está directamente relacionada con su capacidad fotosintética (Slafer et al., 1994). Los principales factores externos como internos que regulan la capacidad fotosintética son: temperatura, humedad relativa, radiación solar, disponibilidad de agua en el suelo, contenido de clorofila en las hojas, entre otros. Por lo tanto, conocer la tasa fotosintética de una planta, nos da una idea del rendimiento que se espera de dicha planta o cultivo. Esto lo demostró Gutiérrez et al. (2000), ya que encontraron una relación positiva entre la tasa fotosintética y el rendimiento de grano en plantas de trigo.

En otros tipos de NPS, el efecto positivo de las NPsZnO en las plantas incluye un mayor porcentaje de germinación, incremento en la longitud de plúmula y radícula, mayor acumulación de biomasa, debido a una mayor actividad fotosintética (Jayarambabu y Siva, 2015; Durairaj *et al.*, 2015; Razzaq *et al.*, 2015)

Cuadro 13. Comparación de medias por dosis para variables relacionadas con la tasa de asimilación de CO₂, evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con (NPsMn₂O₃).

Dosis	A	g_s	C_i	E
	(μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	(mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	(μmol CO ₂ mol aire ⁻¹)	(mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
0	6.08 ab	0.15 b	296.75 ab	5.92 a
10	6.14 ab	0.15 b	299.50 ab	5.92 a
20	5.92 b	0.18 ab	313.58 a	6.56 a
30	6.42 ab	0.16 ab	292.77 ab	5.68 a
40	6.61 b a	0.22 a	315.10 a	6.68 a
50	6.78 ab	0.18 ab	297.07 ab	6.45 a
100	6.93 a	0.17 ab	286.08 b	6.13 a
Media	6.41	0.17	299.98	6.20
Tukey	0.97	0.07	24.81	1.70

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05).

A= Tasa de asimilación de CO₂; g_s= Conductancia estomática; C_i= CO₂ intercelular; E= Transpiración

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el uso de NPs Mn_2O_3 aplicadas al sustrato en forma de suspensión a concentraciones entre 30 y 100 ppm incrementan el diámetro de tallo y altura de planta.

La aplicación de suspensiones de NPs Mn_2O_3 a 50 y 100 ppm duplica el número de frutos por corte.

Para la variable peso de raíz no se encontraron diferencias estadísticas, pero si numéricas, siendo la concentración de 50 ppm, la de mayor peso con 5.16 (g planta⁻¹).

La aplicación de NPs Mn_2O_3 en concentraciones altas 50 y 100 ppm dirigidas al sustrato, en forma de suspensión, reducen el desarrollo del fruto, reflejándose en menor peso por corte. Mientras que para la variable longitud de fruto concentraciones bajas (10 y 20 ppm) incrementan drásticamente el crecimiento del fruto.

Por otra parte, la aplicación de (NPs Mn_2O_3) al sustrato, tiene un efecto positivo en la tasa de asimilación de CO_2 , sobre todo en la etapa vegetativa, superando los valores de la etapa reproductiva.

Estos resultados indican que la aplicación (NPs Mn_2O_3) de en dosis correctas, pueden mejorar variables agronómicas y fisiológicas en plantas de chile poblano (*Capsicum annuum L.*) para su establecimiento en campo. Por lo tanto, los NPs representan una opción como un agroinsumo promotor en el desarrollo de planta, asimilación de CO_2 y rendimiento de diferentes especies. Debido a que la aplicación de NPs es en muy pequeñas cantidades, este insumo puede tener un buen potencial en la promoción de una agricultura sustentable.

VI. LITERATURA CITADA

- Abbasi, M., A. Ghorbani, and M. Moameri. 2016. Effects of silica and silver nanoparticles on seed germination traits of (*thymus kotschyanus*) in laboratory conditions. *Journal of Rangeland Science* 6(3):222-231.
- Adhikari, T., D. Sarkar, H. Mashayekhi y B. Xing. 2016. Growth and enzymatic activity of maize (*Zea mays L.*) plant: Solution culture test for copper dioxide nano particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1):99-115.
- Ali, M. A., I. Rehman, S. Din, A.Q. Rao, A. Latif, T. Husnain. 2014. Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Advancements in Life Sciences*. 1:129-138.
- Alvarado, R., F. Solera, and J.R Vega-Baudrit. 2014. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y de plata estabilizadas con quitosano. Evaluación de su actividad antimicrobiana. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(3): 134-148.
- Anusuya, S., y K. Nibiya. 2016. Silver-chitosan nanoparticles induced biochemical variations of chickpea (*Cicer arietinum L.*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 8:39-44.
- Azimi, R., G. Heshmati, and R. Kavandi. 2016. Evaluation of SiO₂ nanoparticle effects on seed germination in (*Astragalus squarrosus*). *Journal of Rangeland Science* 6(2):135-143.
- Ball, P. 2002. Natural strategies for the molecular engineer. *Nanotechnology* 13:15 – 28.
- Bautista-Baños, S., L. Bravo-Luna y Ma. L. Corona-Rangel. 2004. Manejo de las enfermedades postcosecha en frutas y hortalizas mediante el uso de fungicidas. *Biótica*, 1:107-120.
- Bautista-Baños, S. 2014. *Postharvest Decay. Control Strategies*. Academic Press/Elsevier. (1^o edición), p. 394
- Betancourt Galindo, R., P.Y. Reyes, B. Puente, C. Ávila-Orta, O. Rodríguez, G. Cadenas, R.H. Lira-Saldivar, L.A. García-Cerda. 2014. Synthesis of copper nanoparticles by thermal decomposition and their antimicrobial properties. *Journal of Nanomaterials*, Article ID 980545. 1- 5.

- Boyás, S.M.E., B.S. Bautista, L.L Aldana, F.J. Solorza, A.A. Jiménez, N.L.L. Barrera, A.G. Valverde y J.M. Plascencia. 2015. La nanotecnología en el control de microorganismos patógenos e insectos de importancia económica. En: C. Laréz-Velázquez, S. Kote ich Khatib y F. López González (eds.). Nanotecnología: fundamentos y aplicaciones. (p. 307-321). Universidad de los Andes Venezuela.
- Burman, U., M. Saini, P. Kumar. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of *chickpea seedlings*. Toxicological and Environmental Chemistry. 95: 605-612.
- Buu, Q., T. Hien, H. Chau, X. Tin, T. Van, T. Duong, and T. Ha. 2014. Effects of nano crystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). Vietnam Academy of Science and Technology 5:1-7.
- Buzea, C., I.I. Pacheco, and K. Robbie .2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. Biointerphases 2:17–71.
- Capaldi, A.S., S.A Diniz, G.R Moretto, A.R. Antunes, A.M Zezzi. 2015. Nanoparticles applied to plant science. A review. Talanta. 13: 693-705.
- Chang, Y., M. Zhang, L. Xia, J. Zhang, G. Xing. 2012. The Toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. Materials. 5: 2850-2871.
- Chhowalla, M. 2017. Slow Release Nanofertilizers for Bumper Crops. ACS Central Science 3(3): 156-157
- Chinnamuthu, C.R., y P.M. Boopathi. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. Madras Agric. 96:17-19.
- Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N. & Makarian, H. (2014). Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 45, 530–540.
- Demidchik, V. 2015. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. Environmental and Experimental Botany, 109: 212-228.

- DeRosa, M.C., C. Monreal, M. Schnitzer, R. Walsh and Y. Sultan. 2010. Nanotechnology in fertilizers. *Nature nanotechnology* 5: 91-101
- Dimkpa, C.O., J.E. McLean, W. David, D.W. Britt., A.J. Anderson. 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.
- Engates, K.E. y H.J. Shipley. 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.
- Espinoza, V.N. 2014. El uso de plaguicidas químicos en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), su relación con el medio ambiente y la salud. Tesis de maestría en ciencias especializada en Agroecológica y Ambiente. Universidad Técnica De Ambato. Ambato, Ecuador. Xii p.
- Fang, T., J.L. Watson, J. Goodman, C.O. Dimkpa, N. Martineau, S.J. McLean, D.W. Britt, A.J. Anderson. 2013. Does doping with aluminum alter the effects of ZnO nanoparticles on the metabolism of soil Pseudomonads? *Microbiological Research*. 168: 91-98.
- Feizi, H., P.R Moghaddam, N. Shahtahmassebi, A. Fotovat. 2011. Impact of Bulk and Nanosized Titanium Dioxide (TiO₂) on Wheat Seed Germination and Seedling Growth. *Biological Trace Element Research*. 146. pp. 101-106 DOI:10.107/s12011-011-9222-7.
- Fraceto, L.F., R. Grillo, G.A. De Medeiros, V. Scognamiglio, G. Rea, C. Bartolucci. 2016. Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*. 4:1-5.
- Grillo, R., P.C. Abhilash, L.F. Fraceto. 2016. Nanotechnology Applied to Bio-Encapsulation of Pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 16: 1231-1234
- Gruère, G.P. 2012. Implications of nanotechnology growth in food and agriculture in OECD countries. *Food Policy*. 37: 191-198.

- Hajipour, M.J., K.M. Fromm, A.A. Ashkarran, A.D. Jimenez, L.I. Ruiz, T. Rojo, V. Serpooshan, W.J. Parak y M. Mahmoudi. 2012. Antibacterial properties of nanoparticles. Trends Biotechnol. 30:499-511.
- Hashemi, E. and M. Mosavi. 2013. Effect of anatase nanoparticles (TiO₂) on parsley seed germination (*Petroselinum crispum*) In Vitro. Biol Trace Elem Res 155:283–286.
- Hatami, M., M. Ghorbanpour, and. H. Salehiarjomand. 2014. Nano-anatase TiO₂ modulates the germination behavior and seedling vigority of some commercially important medicinal and aromatic plants. J. Biol. Environ. Sci. 8(22):53-59.
- Jayarambabu, N., y B.S Kumari. 2015. Seed germination and growth parameters response of mung bean influence by biogenic Fe₃O₄ nanoparticles. International Journal of Multidisciplinary Advanced Research Trends 1(3):34-40.
- Karunaratne, D.N. 2007. Nanotechnology in medicine. Journal of Natural Science. 35(3): 149-152.
- Khodakovskaya, M., K. De Silva, A.S Biris, E. Dervishi, H. Villagarcia. 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. ACS Nano 6(3):2128–2135.
- Khodakovskaya, M., M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li, F. Watanabe, and A.S. Biris. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth ACS Nano 3(10):3221-3227.
- Krishna, K., and N. Natarajan. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. Indian Journal of Science and Technology 7(9):1376-1381.
- Krishnaraj, C., B.J. Ji, S.L. Harper, S.I. Yun. 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.

- Kyung-Seok, K. S. and I. C. Kong. 2014. Toxic effects of nanoparticles on bioluminescence activity, seed germination, and gene mutation. *Applied microbiology and biotechnology*. 98: 3295-3303.
- Li, P., Y. Du, L. Huang, N. Mitter, y Z.P. Xu. 2016. Nanotechnology promotes the RyD of new-generation micronutrient foliar fertilizers. *RSC Advances*, 6(73), 69465-69478.
- Lin, D. y B. 2008. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 42: 5580-5585.
- Lira-Saldivar, R.H, A. Hernández-López, L.A. Valdez-Aguilar, L. Ibarra-Jiménez, A. Cárdenas-Flores, and M. Hernández-Suárez. 2014. *Azospirillum brasilense* and *Glomus intraradices* co-inoculation stimulate growth and yield of cherry tomato under shade house conditions. *Phyton Int. J. Exp. Botany*. 83: 133-138.
- Lira Saldivar, R.H. and B. Méndez Arguello. 2016. *Agronanotecnología. Nueva Frontera De La Revolución Verde*. CIQA. Saltillo, México.pp.11-277
- Liu, R., y R. Lal. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment* 514: 131-139.
- López-Moreno, M.L., L.L. Avilés, N.G. Pérez, B.Á Irizarry, O. Perales, Y. Cedeno-Mattei, F. Román. 2016. Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of The Total Environment*. 550(1):45-52.
- Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi, and H. Kashef. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*. 3(1):30-37.
- Mingyu, S., W. Xiao, L. Chunxiang, Q. Xiaoqing, L. Liang, C. Hao, and H. Fashui. 2007. Promotion of energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II by nano-anatase TiO₂. *Biol Trace Elem Res* 119:183–192.
- Mishra, S., H.B. Singh. 2015. Biosynthesized silver nanoparticles as a nanoweapon against phytopathogens: exploring their scope and potential in agriculture. *Applied microbiology and biotechnology*. 99: 1097–1107.

- Monica, R.C., and R. Cremonini. 2009. Nanoparticles and higher plants. *Caryologia* 62(2): 161-165.
- Mukherjee, M., and A. Mahapatra. 2009. Effect of coinage metal nanoparticles and zwitterionic surfactant on reduction of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}](\text{NO}_3)_2$ by iron (III). *Colloid Surface*. 350: 1-7.
- Mukhopadhyay, S.S. 2014. Nanotechnology in Agriculture: Prospects and Constraints. *Journal of Nanotechnology, Science and Applications*, 7: 63-71.
- Naderi, M.R., D.A. Shahraki. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Sci. 5:2229-2232
- Narendhran, S., P. Rajiv y R. Sivaraj. 2016. Toxicity of ZnO nanoparticles on germinating *Sesamum indicum* (Co-1) and their antibacterial activity. *Bulletin of Materials Science* 39(2):415-421
- Nuruzzaman, M., M.M. Rahman, Y. Liu, R. Naidu. 2016. Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *Journal of agricultural and food chemistry*. 64: 1447-1483.
- Ocsoy I., M.L Paret, M.A Ocsoy, S. Kunwar, T. Chen. 2013. Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans*. *American Chemical Society Nano*. 7(10):8972–8980.
- Olejnik, M., B. Krajnik, D. Kowalska, M. Twardowska, N. Czechowski, E. Hofmann, S. Mackowski. 2013. Imaging of fluorescence enhancement in photosynthetic complexes coupled to silver nanowires. *Applied Physics Letters*. 102: 083-703.
- Prapatsorn, B., B. Kositsup, P. Kumar, S. Baruah, and J. Dutta. 2011. Toxicity of ZnO and TiO₂ nanoparticles on germinating rice seed (*Oryza sativa* L). *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics* 1(4):282-285
- Prasad, R., V. Kumar, and K.S. Prasad. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.

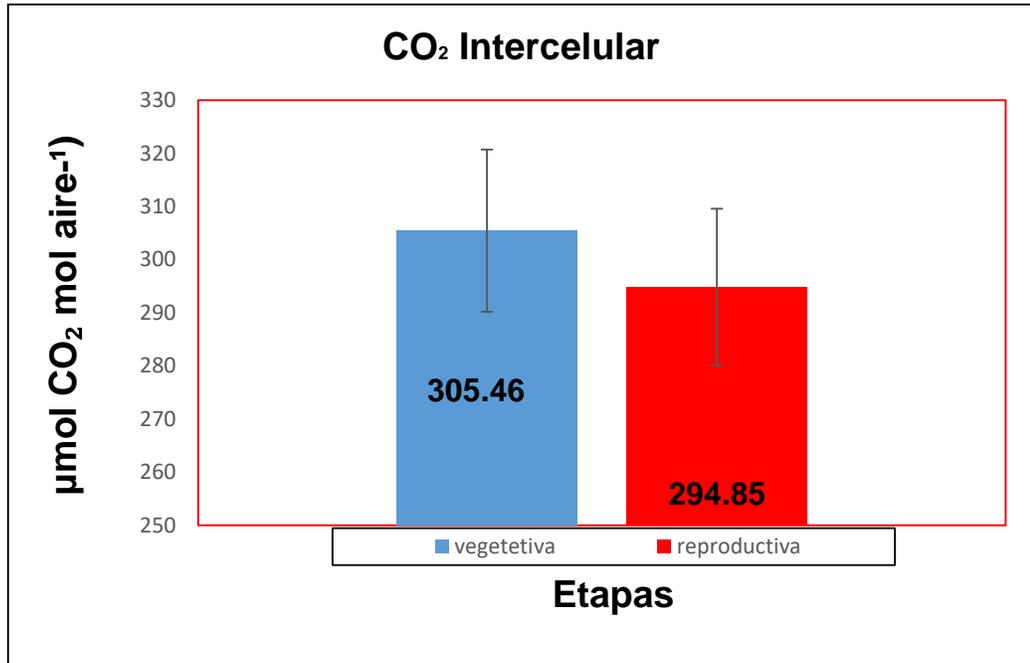
- Qi M, Liu Y, Li T (2013) Nano-TiO₂ improve the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress. *Biol Trace Elem Res* 156(1–3):323–328.
- Raskar, S.V., and S.L. Laware. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3(2):467-473.
- Razzaq, A., R. Ammara, H.M. Jhazab, T. Mhamood, A. Hafeez, and S. Hussain. 2015. A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *Journal of Nanoscience and Technology* 2(1):55–58.
- Resham, S., M. Khalid, and A.G. Kazi. 2015. Nanobiotechnology in Agricultural Development. In *Plantomics: The Omics of Plant Science*. 683-698.
- Rezaei, M., and H. Abbasi. 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.
- Rico, C.M., J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. 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.
- Ruiz Torres, N.A., J.I. García López, R.H. Lira Saldívar, I. Vera Reyes, y B. Méndez Argüello. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. In R. H. Lira Saldívar, & B. Méndez Argüello, *Agronano Tecnología Nueva frontera de la Revolución Verde*. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 42-60.
- Sabir, S., M. Arshad, S.K. Chaudhari. 2014. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. *The Scientific World Journal*. 1:1-8.
- Saeid, S., and H. Hojjat. 2016. Effects of silver nanoparticle exposure on germination of Lentil (*Lens culinaris Medik.*). *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5(3):248-252.
- Salama H. M. H., 2012. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris L.*) and corn (*Zea mays L.*). *Int. Res. J. Biotechnol.* 3 (10): 190-197.

- Sathiyarayanan, A., y K. Nibiya. 2016. Silver-chitosan nanoparticles induced biochemical variations of chickpea (*Cicer arietinum L.*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 8: 39–44.
- Scott, N., and H. Chen. 2013. Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems. *Industrial Biotechnology*. 9: 17-18.
- Servin, A.D., J.C. White. 2016. Nanotechnology in Agriculture: Next Steps for Understanding Engineered Nanoparticle Exposure and Risk. *Nano Impact*. 1: 9-12.
- Sharma, P., D. Bhatt, M.G.H Zaidi, P.P Saradhi, P.K. Khanna, y S. Arora. 2012. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of (*Brassica juncea*). *Applied biochemistry and biotechnology*, 167(8), 2225-2233.
- Sharon M., A.K. Choudhary, R. Kumar. 2010. Nanotechnology in agricultural diseases and food safety. *Journal Phytology* 2: 83–92.
- Shyla, K.K, and N. Natarajan. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*, 7: 1376-1381
- Siddiqui, M.H., H.M. Al-Whaibi, y F. Mohamad. 2015. Nanotechnology and plant Sciences. *Nanoparticles and Their Impact on Plants*. Springer International Publishing 305 p.
- Singh, A., N.B. Singh, I. Hussain, H. Singh, S.C. Singh. 2015. Plant-nanoparticle interaction: an approach to improve agricultural practices and plant productivity. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. 4: 25-40.
- Srilatha B. 2011. Nanotechnology in Agriculture. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*. (2):123. doi:10.4172/2157-7439.1000123.
- Suriyaprabha, R., G. Karunakaran, R. Yuvakkumar, P. Prabu, V. Rajendran, N. Kannan. 2012. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays L.*) to porous silica nanoparticles in soil. *J. Nanopart. Res.* 14(1):1–14.

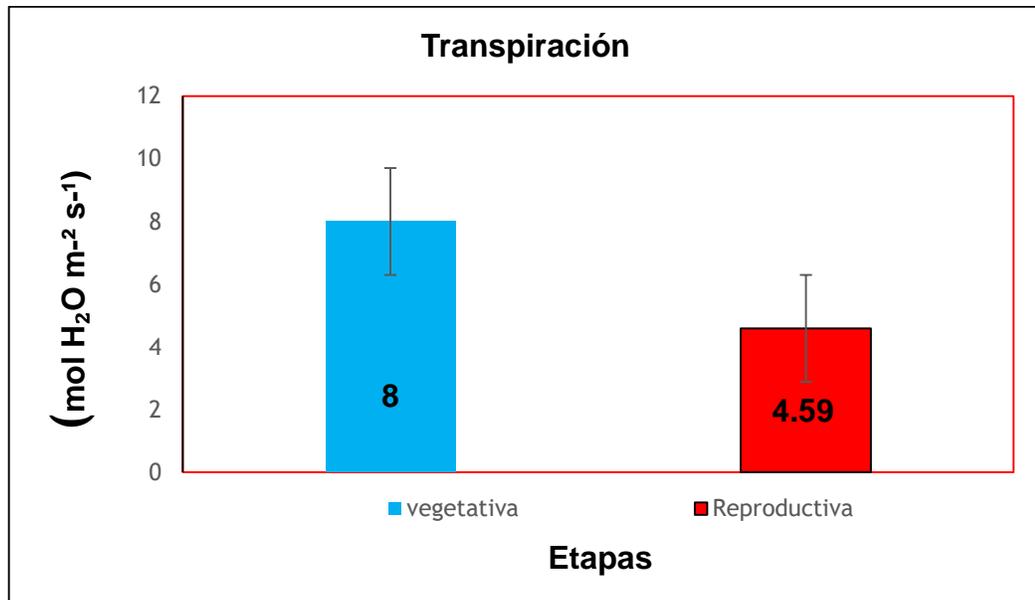
- Tang, Y., R. He, J. Zhao, G. Nie, L. Xu, y B. Xing. 2016. Oxidative stress-induced toxicity of CuO nanoparticles and related toxicogenomic responses in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*, 212, 605-614.
- Tarafdar, J.C., R. Raliya, H. Mahawar, I. Rathore. 2014. Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*. 3:257-262.
- Taiz, L. and E. Zeiger. *Plant Physiology*. 4th ed. Massachusetts: Sinauer Associates Inc. 2006, 83 p. ISBN-10: 0878938567.
- Ulla, S. and M. Arshad. 2014. Exposure-Response of (*Triticum aestivum*) to titanium dioxide nanoparticles application: seedling vigor index and micronuclei formation. *Institute of Environmental Sciences and engineering* 20(1):57-61.
- Vanderroost, M., P. Ragaert, F. Devlieghere, B. De Meulenaer. 2014. Intelligent food packaging: the next generation. *Trends in Food Science and Technology*. 39: 47–62.
- Vannini, C., G. Domingo, E. Onelli, B. Prinsi, M. Marsoni, L. Espen, & M. Bracale. 2013. Morphological and proteomic responses of (*Eruca sativa*) exposed to silver nanoparticles or silver nitrate. *PLoS One*, 8(7), 1-8.
- Vimala, V., S.K. Clarke, S. Urvinder Kaur. 2016. Pesticides detection using acetylcholinesterase nanobiosensor. *Biosens Journal*, 5: 1-4.
- Walker N., and J. Bucher. 2009. A 21st Century Paradigm for Evaluating the Health Hazards of Nanoscale Materials? *Toxicological Sciences*. 110(2): 250-251. DOI: 10.1093/toxsci/kfp106.
- Wang, Z., X. Xie, J. Zhao, X. Liu, W. Feng, J.C. White, y B. Xing. 2012. Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays L.*). *Environmental science y technology*, 46(8), 4434-4441
- Wang, S., H. Liu, Y. Zhang, H. Xin. 2015. Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*, 34: 554-561.

- Wang, Z., L. Xu, J. Zhao, X. Wnag, J. White, and B. Xing. 2016. CuO nanoparticle interaction with *Arabidopsis thaliana*: toxicity, parent-progeny transfer, and gene expression. *Environmental Science & Technology*. 50:6008-6016.
- Xue, J., Z. Luo, L. Li, P. Ding, Y. Cui, Q. Wu. 2014. A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*. 4: 1-9.
- Yadollahi, A., K. Arzani, H. Khoshghalb. 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.
- Yah, C.S. y G.S. Simate. 2015. Nanoparticles as potential new generation broad spectrum antimicrobial agents. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*. 23 (1), 1-10.
- Yamamoto, O. 2001. Influence of particle size on the antibacterial activity of zinc oxide. *International Journal of Inorganic Materials*, 3 (7), 643-646.
- Yin, Y., Q. Guo, Y. Han, L. Wang, S. Wan. 2012. Preparation, characterization and nematicidal activity of lansiumamide B nano-capsules. *Journal of Integrative Agriculture*. 11: 1151-1158.
- Zafar, H., A. Alli, J.S. Ali, I.U. Haq, y M. Zia. 2016. Effect of ZnO nanoparticles on (*Brassica nigra*) seedlings and stem explants: Growth dynamics and antioxidative response. *Frontiers in Plant Science* 7: 1-8.
- Zhao, L., J.R. Peralta-Videa, C.M. Rico, J.A. Hernandez-Viezcas, Y. Sun, G. Niu, y J.L Gardea-Torresdey. 2014. CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(13), 2752-2759.
- Zheng, L., F. Hong, S. Lu, C. Liu. 2005. Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biological trace element research*. Vol. 104, pp. 83-91.

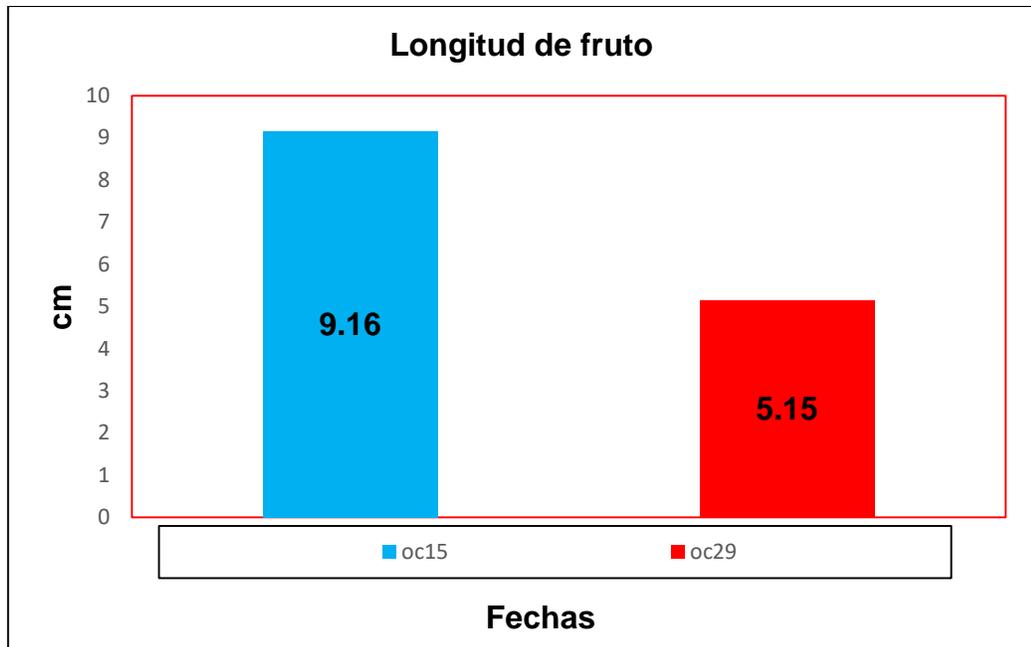
VII. ANEXOS



Anexo 1. Tasa de asimilación de CO₂, evaluada en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃.



Anexo 2. Tasa de transpiración evaluadas en plantas de chile poblano en ensayo de invernadero tratadas con NPsMn₂O₃.



Anexo 3. Longitud de fruto en diferente fecha de corte para plantas de chile poblano tratadas con NPsMn_2O_3 .