

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto de la Aplicación Foliar de Nanopartículas de ZnO en Plantas *Capsicum chinense* (var. *Ba'alche*) en Condiciones de Hidroponía e Invernadero Utilizando Zeolita como Sustrato

Por:

PABLO JOSUÉ LLANES GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto de la Aplicación Foliar de Nanopartículas de ZnO en Plantas *Capsicum chinense* (var. *Ba'alche*) en Condiciones de Hidroponía e Invernadero Utilizando Zeolita como Sustrato

Por:

PABLO JOSUÉ LLANES GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

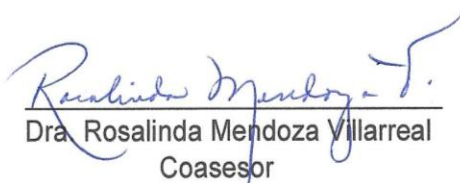
Aprobada por el Comité de Asesoría:



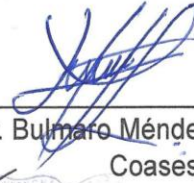
Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor Principal Interno



Dra. Ileana Vera Reyes
Asesor Principal Externo



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Coasesor



Dr. Bulmaro Méndez Argüello
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía
Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila México

Diciembre, 2017

Dedicatoria

A mis padres

Sra. María de Jesús García Blanco y Sr Hilario Llanes Castro

Por darme la vida, pero lo más importante por creer y confiar en mí, y apoyarme cuando más los necesite, gracias por todo su amor y comprensión, por guiarme por el buen camino dándome su mejor herencia el estudio, por ayudarme moral y económicamente durante mi trayectoria por la universidad para lograr una carrera, y que gracias a los esfuerzos y al apoyo constante hoy hemos logrado esa meta que tanto costo, fruto del trabajo y sacrificio de ustedes muchas gracias.

A mis hermanos

Fanny Johany, Alondra, Perla Lisset, Zaira Yamel y Kevin Imanol.

Gracias por su apoyo y amor de hermanos que siempre me brindaron durante este largo trayecto de mi carrera, por formar parte muy especial de mi vida y estar cuando más los necesite y compartir nuestras alegrías y tristezas gracias por todo eso y más.

Agradecimientos

A DIOS: por darme la oportunidad de la vida y de seguirme superando cada día, por cuidar y bendecir mi camino para llegar a este momento tan especial.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro: Le doy las gracias a mi Alma Mater por brindarme lo mejor de mi vida, ya que no solo fue mi universidad si no también mi casa, la cual me vio crecer profesionalmente.

Lic. Francisco Ortiz Serafín: quien siempre me apoyo desde el primer día que llegue a esta universidad.

Dr. Ricardo Hugo Lira: a quien sin conocerme siempre estuvo dispuesto apoyarme, por invitarme a formar parte de su equipo de trabajo en este proyecto, gracias por sus consejos y conocimientos impartidos.

Dra. Ileana Vera Reyes: gracias por sus conocimientos, y todo su apoyo incondicional ya que usted formo parte importante en este trabajo, gracias por todo su tiempo y paciencia dedicada para escribir esta tesis.

Dr. Bulmaro Méndez Argüello: por el apoyo brindado durante todo el trabajo realizado y sus conocimientos brindados, gracias por toda la disposición que tuvo para apoyarme

Dr. Valentín Robledo Torres: por aceptar ser parte de mi tesis como asesor principal.

Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal: por sus conocimientos brindados en clases y aceptar ser parte del comité de asesoría.

M.C. Fátima Grajales Sarabia: por apoyarme en toda la realización del experimento, y sus conocimientos compartidos

Al proyecto 268 de Fronteras de la Ciencia COANACYT.

A mis amigos

A Nicolás Atanasio Tavares: por sus consejos y todo el apoyo brindado durante toda mi vida profesional, ya que fuiste más que un amigo eres como mi hermano con quien compartimos alegrías y tristezas gracias por todo.

A Nelson Atanasio Tavares: por todo su apoyo brindado y que me demostró que los verdaderos amigos están en todo momento.

A Yedid Vásquez Coronel: gracias por cada momento vivido, por formar parte importante de mi vida, por todo el tiempo que estuviste apoyándome en las buenas y en las malas, por tus consejos y amor incondicional gracias.

Ana Yareli Mohedano y Bertha Romero: gracia por su amistad y cariño brindado durante todo este tiempo.

A Edith Ramos, Jesús Alonzo Cortes, Omar Núñez, Daniel Martínez, y Guillermo Vargas: por formar parte del equipo de trabajo durante todo mi proyecto de tesis y estarme apoyando gracias por todo.

A todos mis compañeros de generación en especial a **Edith Hernández, Denisse Hernández, y Guillermo Caballero:** gracias por su amistad y estar en las buenas y en las malas ya que ustedes fueron con los que más momentos compartí y siempre estuvieron cuando los necesite.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iv
I. INTRODUCCION	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
II.1. Chile Habanero (<i>Capsicum chinense J.</i>).....	4
II.2. Descripción del Cultivo	5
II.3. Clasificación Taxonómica.....	5
II.4. Hidroponía.....	6
II.4.1. Sustratos Utilizados en Sistemas Hidropónicos	7
II.5. La Zeolita en la Agricultura.....	9
II.6. Producción de Hortalizas en Invernadero	11
II.6.1. Estadísticas de Producción de Invernadero en México	13
II.7. Nanotecnología (NT)	13
II.7.1. Nanotecnología en la agricultura	15
II.7.2. Nanopartículas Metálicas de Óxido de Zinc.....	17
II.7.3. Justificación del Uso de Nanopartículas.....	18
III. MATERIALES Y METODOS	19
III.1. Localización del Sitio.....	19
III.2. Características Climáticas del Lugar.....	19
III.3. Imbibición de Semillas	19
III.4. Siembra.....	20
III.5. Trasplante	20
III.6. Solución Nutritiva.....	22

III.7. Riegos	23
III.8. Podas y Tutorio	23
III.9. Cosecha	24
III.10. Distribución de los Tratamientos	25
III.11. Preparación y Aplicación de la Solución con Nanopartículas	26
III.12. Variables Evaluadas	27
III.13. Análisis Estadístico	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
IV.1. Crecimiento	29
V. CONCLUSIONES	41
VI. LITERATURA CITADA	42
VII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Tabla 1. Tipos de nanomateriales	14
Tabla 2. Proporción de los sustratos utilizados para la producción hidropónica de chile habanero.....	21
Tabla 3. Distribución de tratamientos aplicados a plantas de <i>C. chinense</i> cultivadas en hidroponía bajo condiciones de invernadero.....	26
Tabla 4. Efectos fisiológicos del sustrato en plantas de <i>C. chinense</i> (var. <i>Ba´alche</i>) en condiciones de hidroponía e invernadero a los 96 DDT.....	30
Tabla 5. Interacciones de los sustratos y la aplicación foliar de NPs ZnO en el crecimiento de plantas de chile habanero.....	33
Tabla 6. Efectos en la producción de <i>Capsicum chinense</i> causados por el sustrato a los 96 DDT.....	36
Tabla 7. Interacciones de los sustratos y la aplicación foliar de NPs ZnO en el rendimiento y peso fresco de plantas de chile habanero.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1. A) Planta de chile habanero utilizada; B) plantas trasplantadas en invernadero.....	22
Figura 2 A) Podas de chupones en plantas de Chile habanero; B) Tutoreo de plantas de Chile habanero.....	24
Figura 3. Frutos cosechados de Capsicum chinense var. Bá alche.....	25
Figura 4. Morfología de las nanopartículas de óxido de zinc obtenida por microscopía electrónica de transmisión (TEM).....	27
Figura 5. A) Altura de plantas de Chile habanero; B) Diámetro de tallo de las Chile habanero a los 16, 46 y 90 días de trasplante.....	29

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Peso seco de plantas de chile habanero.....	51
Anexo 2. Análisis de varianza para la variable altura de planta, primer muestreo.....	51
Anexo 3. Comparación de medias para la altura de la planta, primer muestreo.....	52
Anexo 4. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo, primer muestreo.....	52
Anexo 5. Comparación de medias para el diámetro de tallo, primer muestreo.....	53
Anexo 6. Análisis de varianza para la variable índice relativo de clorofila, primer muestreo.....	53
Anexo 7. Comparación de medias para el índice relativo de clorofila, primer muestreo.....	54
Anexo 8. Análisis de varianza para la variable altura de planta, segundo muestreo.....	54
Anexo 9. Comparación de medias para la altura de la planta, segundo muestreo.....	55
Anexo 10. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo, segundo muestreo.....	55
Anexo 11. Comparación de medias para el diámetro de tallo, segundo muestreo.....	56
Anexo 12. Análisis de varianza para la variable índice relativo de clorofila, segundo muestreo.....	56
Anexo 13. Comparación de medias para el índice relativo de clorofila, tercer muestreo.....	57

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló dentro de las instalaciones del Centro de investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, Coahuila, México durante el año 2017, se evaluó dos tipos de sustratos zeolita-perlita y un tipo de nanopartículas de óxido de zinc en el cultivo de chile habanero *Capsicum chinense* (var. *Ba'alche*) para el establecimiento del experimento se estableció un diseño experimental bifactorial que constó de 15 tratamientos, cada uno con 4 repeticiones incluido en ellos el testigo absoluto, para el establecimiento del cultivo se utilizaron dos tipos de sustrato, zeolita y perlita en proporciones de 100, 30-70, 50-50, 70-30 y 50-500% respectivamente, se realizó la aplicación foliar nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) a dos concentraciones 1000 y 2000 mg L⁻¹. La primera toma de datos se realizó a los 16 días, la segunda a los 46 días y la tercera toma fue a los 96 días, cabe mencionar que en las dos primeras tomas de datos se evaluaron los parámetros de altura de planta, diámetro de tallo, e índice de clorofila y en la tercera toma de datos se anexó el parámetro de número de frutos, peso fresco de frutos y de cada una de las partes botánicas de la planta, además del área foliar, en donde las plantas crecidas zeolita (100%) con la aplicación de foliar de NPs ZnO (1000 mg L⁻¹) tuvieron el mejor rendimiento de chile habanero, así como presentaron el mejor desarrollo y crecimiento de las plantas.

I. INTRODUCCION

Los chiles pertenecen al género *Capsicum*, de la familia Solanáceae. Existen 27 especies de *Capsicum* de las cuales cinco son domesticadas y cultivadas: *C. annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens*. El chile habanero (*C. chinense* Jacq.) ocupa el primer lugar en producción en Yucatán con una superficie de producción de 262.22 ha a cielo abierto y de 41.14 ha en invernadero (SIAP 2011). El chile habanero se utiliza como fruto fresco o procesado en forma de encurtidos, enlatados, pastas, salsas y congelados (González *et al.*, 2006). Otro uso importante del chile es la aplicación de la capsaicina en el tratamientos médicos como analgésico y por sus propiedades antiinflamatorias (Vergara *et al.*, 2006; Maggi 1992).

La hidroponía, es la técnica agropecuaria más racional que el hombre ha inventado en más de siete mil años de toda la historia civilizada. Su futuro es aun impredecible, ya que el agricultor interviene directamente en el proceso fisiológico de la planta. Hoy en día la hidroponía es el método más intensivo de producción hortícola, ya que produce en pequeñas áreas, rendimientos muchos mayores con menores exigencias de mano de obra en comparación con los cultivos tradicionales, generalmente son cultivos desarrollados en sistemas de alta tecnología y de fuerte capital y es aplicado exitosamente con fines comerciales en países desarrollados. En la última década, el área mundial, destinada a la

producción hidropónica se ha incrementado considerablemente al pasar de 12,000 ha en 1996 a 40,000 en el 2008, destacándose México y Brasil como países hidropónicos con algo más de 2,000 ha. (Alpizar, 2010).

El sustrato es un medio inerte, que tiene doble función: anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles la respiración y contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan. El sustrato utilizado en un sistema hidropónico debe reunir un conjunto de características que lo hagan apto para cultivar, por ello a veces se recurre a mezclar diversos materiales, buscando que unos aporten las características que le faltan a otros; siendo un aspecto de mucha importancia la retención de humedad que debe ser en cantidades adecuadas y en forma homogénea, proporcionando a la planta la posibilidad de utilizar el agua como vehículo para sus funciones metabólicas.

El uso de grandes cantidades de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura intensiva tradicional provoca contaminación del suelo, agua y plantas, dañando así a los ecosistemas naturales, seres humanos y animales. Por eso, la agronotecnología como área de la ciencia emergente procura encontrar métodos amigables para mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de las prácticas agrícolas modernas (Grillo *et al.*, 2016; Ditta *et al.*, 2015), así como controlar las enfermedades y plagas de los cultivos (Patel *et al.*, 2014). Además del potencial que tienen los nanomateriales para mejorar el crecimiento de las plantas, al ser utilizados como nanofertilizantes para incrementar la productividad agrícola (Liu *et al.*, 2016).

Objetivo General

Evaluar el efecto de tres dosis de zeolita y dos de nanopartículas óxido de zinc, sobre el crecimiento y rendimiento de plantas de chile habanero bajo condiciones de invernadero.

Objetivos Específicos

1. Analizar el efecto del uso de zeolita como sustrato bajo condiciones hidropónicas e invernadero, en el crecimiento y rendimiento de las plantas de chile habanero.
2. Analizar el efecto del uso nanopartículas de óxido de zinc en el crecimiento y rendimiento de plantas de chile habanero bajo condiciones hidropónicas e invernadero.
3. Analizar la interacción de las nanopartículas de óxido de zinc con el uso de zeolitas en sistemas hidropónicos.

Hipótesis

La aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc en combinación con zeolita natural, incrementará el crecimiento y rendimiento del cultivo de chile habanero bajo condiciones de hidroponía e invernadero en comparación con el tratamiento control.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II.1. Chile Habanero (*Capsicum chinense J.*)

El chile habanero (*Capsicum chinense Jacq.*) es un cultivo de importancia en México. La Península de Yucatán es la región donde más se cultiva, además de considerarse como su lugar de origen.

Diversos estudios realizados definen al centro de origen del género *Capsicum* a una gran área ubicada entre el sur de Brasil y el este de Bolivia, el oeste de Paraguay y el norte de Argentina. En esta región se observa la mayor distribución de especies silvestres en el mundo. Sin embargo, un estudio realizado por Laborde indicó que el *C. chinense* era originario de América del Sur, de donde fue introducido a Cuba, aunque en la isla no se siembra ni se consume y de ahí se cree que fue traído a la Península de Yucatán. Esta hipótesis se refuerza al comprobar que *C. chinense* Jacq. Es el único chile que no tiene nombre maya, a diferencia de otros (Soria *et al.*, 2002).

En Yucatán el chile *C. chinense* es comúnmente llamado “habanero”. Este chile se encuentra distribuido en toda la península, donde se observan diferentes formas, colores y tamaños de los frutos. Es un cultivo que tiene gran importancia económica para los productores de hortalizas en el Estado de Yucatán: ocupa el segundo lugar, después del cultivo del tomate, en cuanto a superficie cultivada. La mayor superficie de cultivo se encuentra en la parte norte del estado y contribuye

con más de 90 % del volumen de la producción estatal, la cual se comercializa y se consume principalmente en fresco (Ruiz *et al.*, 2011). En la península de Yucatán se concentra la producción y área cultivada, estimándose ésta, en cerca de 1,000 ha (Borges-Gómez *et al.*, 2014), constituyendo uno de los cultivos de mayor importancia para la economía rural (SAGARPA, 2012). Más de 25,000 hectáreas tienen potencial para cultivarse con chile habanero, producto que cada año tiene más demanda en el mercado nacional e internacional (Ruiz-Bello, 2009).

II.2. Descripción del Cultivo

El Chile habanero es de ciclo anual, considerándose como una planta perenne que puede alcanzar hasta 12 meses de vida, dependiendo del manejo agronómico que se le dé. Su altura es variable pero en los cultivares comerciales puede oscilar entre 75 y 120 cm, su diámetro de tallo varía entre 1.5 y 2.5 cm. En cada ramificación y pueden presentar racimos de hasta 6 flores, dando lugar a un promedio de tres frutos.

II.3. Clasificación Taxonómica

Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2009), presenta la clasificación del chile habanero describiendo al reino y especie al que pertenece.

Jacq., 1776 ubico el chile habanero de la siguiente manera

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliosida

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Género: Capsicum L.

Especie: *C. chinense*

II.4. Hidroponía

La Hidroponía es una técnica que permite el cultivo de plantas sin suelo. Se inicia con el crecimiento de plantas en los océanos primigenios y otras grandes masas de agua y data aproximadamente desde el tiempo que la tierra fue creada. El cultivo hidropónico ha sido utilizado, como herramienta de cultivo manejado por el hombre, muchos creen que empezó en la antigua Babilonia, en los famosos Jardines Colgantes que se conocen como una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo, en lo que probablemente fuera uno de los primeros intentos exitosos de cultivar plantas sin suelo.

Para los sistemas de cultivo hidropónico es de importancia que la solución nutritiva contenga todos los elementos necesarios y en la composición correcta. La composición correcta depende del cultivo y de su fenología.

La hidroponía permite atender necesidades alimenticias sin pensar en

grandes emprendimientos, ya que podemos lograr cultivos hidropónicos en casa, en el jardín o en la azotea ya sean hortalizas, flores y hasta pequeños arbustos o frutillas, permitiendo obtener los productos para una alimentación saludable y con una buena forma de terapia ya que ayuda a bajar los altos niveles de estrés.

II.4.1. Sustratos Utilizados en Sistemas Hidropónicos

La hidroponía es una tecnología para desarrollar plantas en solución nutritiva (SN) (agua y fertilizantes), con o sin el uso de un medio artificial (arena, grava, vermiculita, lana de roca, etc.) para proveer soporte mecánico a la planta. Se conoce como sustrato cualquier material sólido distinto del suelo, que en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular y se puede definir por una serie de características físicas, químicas y biológicas, que determinan su comportamiento como medio de cultivo. De un sustrato se espera que sea el medio de cultivo ideal, mediante el cual obtengamos el máximo rendimiento de un cultivo. De acuerdo con Beltrano *et al.* (2015), está formado por tres fases que a continuación se mencionan:

Fase sólida, constituida por las partículas del sustrato propiamente dicha.

Fase líquida, constituida por el agua o solución que contiene sustancias disueltas.

Fase gaseosa, que es el aire en los poros del sustrato.

Shany (2004) señala que el sustrato tiene que ser fino, aireado, sano, libre

de enfermedades y de semillas de malezas. Por eso, hay que escoger bien los materiales que sirven para preparar la mezcla, debiéndose escoger únicamente materiales de alta calidad.

Hay tres tipos principales de cultivo sin suelo: sustratos de amortiguación (por ejemplo, sustratos de turba), sustratos inertes (por ejemplo, lana de roca) y sin sustratos (por ejemplo, la técnica de raíz flotante o NFT). Aunque NFT se usa comercialmente, se informa que posee ciertos riesgos, por ejemplo, propagación de enfermedades y falta de capacidad de amortiguación por errores en la mala administración. Por otro lado, la cultura del sustrato está ganando más importancia año tras año en todo el mundo. Los sustratos utilizados difieren según los países, por ejemplo, la lana de roca es común en el noroeste de Europa, mientras que la perlita y la piedra pómez minada localmente se usan mucho en el sur de Europa (Van Os, 2000).

Dentro de los principales sustratos utilizados de amortiguación en este tipo de sistemas se encuentra la perlita, vermiculita, arena, arcilla expandida, gravilla, musgo, cascarilla de arroz, turba, etc. La perlita es ampliamente utilizada en esta técnica, debido a que es una roca volcánica higroscópica y químicamente inerte, compuesta básicamente por sílice y aluminio, la cual tiene, la capacidad de que absorbe fácilmente la humedad. La perlita expandida tiene una densidad media de alrededor de 130 kg/m^3 , se expande cuando se calienta rápidamente a una temperatura entre 800 y $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ (Shawyer y Pizzali, 2005). Sin embargo, la estructura de las zeolitas le confiere propiedades particulares de adsorción e

intercambio iónico, lo que las hace potencialmente útiles en el campo de la producción de cultivos hidropónicos (Harland *et al.*, 1999).

II.5. La Zeolita en la Agricultura

Las zeolitas se han utilizado en la agricultura desde la década de 1960 como mejoradores de suelo, aditivos de fertilizantes y como fertilizantes de liberación lenta, debido a la eficacia de estos sólidos cristalinos micro-porosos como intercambiadores de cationes y la capacidad de retención de agua (Jakkula, 2005). El agua molecular de hidratación se encuentra débilmente retenida dentro de los poros y canales del armazón, rodeando a los cationes “cambiables” (Briceño y del Castillo, 2008).

En la agricultura una de las aplicaciones más importantes de las zeolitas es por la propiedad de liberación lenta y controlada del fertilizante. La expresión liberación lenta es sinónimo de liberación retardada, liberación controlada, disponibilidad controlada, de acción lenta o liberación medida (Jakkula, 2005). En uno de los primeros trabajos acerca de la utilidad de la zeolita para mejorar la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante nitrogenado, se reportó que las rocas zeolíticas contribuyen a evitar las pérdidas de los iones de amonio, que son convertidas rápidamente por las bacterias del suelo a iones nitrato (Boles, 1972).

Las zeolitas son aluminosilicatos de estructura de armazón, formada de

aniones O^{2-} ; unidos a cationes Si^{4+} y Al^{3+} , además de poseer una serie de cationes intercambiables o de compensación como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} , cuyo papel es estabilizar la carga del material (Coombs *et al.*, 1997; Milovski *et al.*, 1998). Las zeolitas presentan estructuras porosas, alta capacidad de retención de humedad y de intercambio catiónico. Sus características físicas y químicas las hacen un sustrato atractivo para cultivos hidropónicos. Se resalta que las plántulas establecidas en zeolitas tienen mejor crecimiento que en otros sustratos como el tezontle de granulometría gruesa (Urbina *et al.* 2006).

En los últimos años ha habido un interés creciente en la utilización de aluminosilicatos naturales en la agricultura. Gracias a sus propiedades físicas y químicas únicas, pueden ser utilizadas en la producción de fertilizantes minerales. Una amplia gama de aplicaciones de zeolita promueve la búsqueda de otras posibilidades para su uso, en virtud de las exigencias actuales de la agricultura ecológica o sustentable, hay amplias áreas de aplicación de un producto natural, material inerte y no tóxico, tal como la zeolita natural (Szerement *et al.*, 2014). La estructura de la zeolita natural del tipo clinoptilolita es ideal para procesos de intercambio de iones y de absorción, también puede ser utilizada para mejorar las propiedades físicas de los suelos y para el tratamiento de suelos contaminados. También es adecuada en muy pequeñas cantidades como aditivos para la alimentación animal (Reháková *et al.* 2004). Algunos autores señalan que (Gül *et al.*, 2005) la zeolita podría proporcionar economía en el uso de nutrientes y reducir la contaminación ambiental por la disminución de la cantidad de elementos

perdidos por lixiviación y volatilización.

Las zeolitas tienen muchos usos, entre lo que destacan:

- Ablandamiento de aguas industriales y domésticas (remoción de Ca^{2+} y Mg^{2+}).
- Eliminación de iones NH_4^+ de aguas de proceso.
- Eliminación de metales pesados de residuales industriales.
- Soporte de fertilizantes y drogas medicinales.
- Enmendante de la capacidad de intercambio de suelos agrícolas.
- Soporte de microbicidas de amplio espectro (Ag y Zn).

De acuerdo con estudios realizados sobre la capacidad que tiene la zeolita de absorber el amoníaco (NH_3) de mezclas gaseosas y el catión NH_4^+ de soluciones sólidas (Tsitsishvili *et al.*, 1992).

II.6. Producción de Hortalizas en Invernadero

En el siglo XIX aparecen los primeros invernaderos con cubierta a dos aguas y el cultivo de uvas, melones, melocotones y fresas se generaliza; a finales de ese siglo se introducen los tomates (una hortaliza que, años antes, era considerada venenosa). La tecnología hoy en día, permite cultivar en un invernadero cualquier especie hortícola, en cualquier región, siempre y cuando se climatice el invernadero, para lo cual se han llevado a cabo pruebas comparativas para encontrar la mejor combinación, entre los diferentes tipos de invernadero y

las técnicas de climatización (Castilla, 2007).

El invernadero es un sistema de producción que puede incrementar la eficiencia en el uso del agua, creando un microclima para mejorar la fotosíntesis de la planta, reduciendo la evapotranspiración excesiva e incrementando los rendimientos. El suministro de productos hortícolas de calidad durante todo el año puede lograrse o bien con invernaderos de alta tecnología o cultivando en dos sitios cuyos períodos de cosecha sean complementarios (Castilla y Hernández, 2007).

En México existen muchas regiones con condiciones naturales idóneas para el establecimiento de invernaderos, debido a ello la agricultura protegida se ha desarrollado en forma acelerada, ya que permite obtener productos de calidad tanto para mercado nacional como de exportación. De esta forma, el empleo de invernaderos y la agricultura protegida están contribuyendo ampliamente en la producción de alimentos y al desarrollo de varias zonas agrícolas de México.

En combinación con los sistemas hidropónicos, es uno de las técnicas agrícolas alternativas más utilizadas, cuyo objetivo es eliminar o disminuir factores limitantes del crecimiento vegetal, asociados al medio ambiente, sustituyéndolos por soportes de cultivo y técnicas de fertilización (Duran *et al.*, 2000)

II.6.1. Estadísticas de Producción de Invernadero en México

En los últimos años, la superficie agrícola bajo sistemas de invernadero en México se ha incrementado considerablemente en el período 1999 a 2004. En el año 2004 se estimaba un crecimiento del 218%; existían 2,545 hectáreas operando y 669 hectáreas en construcción (Guantes J., 2006).

Hoy en día, en México existen alrededor de 20,000 hectáreas bajo agricultura protegida (Sagarpa, 2013), de las cuales aproximadamente 12,000 son de invernadero y las otras 8,000 corresponden a malla sombra y macrotúnel entre otras estructuras. Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son tomate (70%), pimiento (16%) y pepino (10%).

II.7. Nanotecnología (NT)

La nanotecnología (NT) es una rama de la ciencia que estudia el diseño, síntesis, y manipulación de la estructura de las nanopartículas (NPs) con tamaño de 1 a 100 nm. Estas NPs tienen muy diversas aplicaciones para la agricultura y la biotecnología, áreas en las que se habían incorporado las disciplinas de agronanotecnología y nanobiotecnología; que combinan el procesamiento químico, ciencia de los materiales y las disciplinas ambientales (Korbekandi *et al.*, 2015). El estudio y aplicación de la NT ha crecido rápidamente en los últimos años, teniendo el potencial de modernizar la agricultura con nuevas herramientas para mejorar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes.

Los nanomateriales o nanopartículas (NP) pueden, en teoría, ser procesados a partir de casi cualquier sustancia química (Dreher 2004), por lo que su diversidad es muy extensa (Tabla 1) (Gutiérrez 2009).

Tabla 1. Tipos de nanomateriales

Principales tipos de nanomateriales
Liposomas
Polímeros
Nanopartículas de cerámica
Nanopartículas metálicas
Nanopartículas de carbono
Puntos cuánticos
Dendrímeros

Las NP manufacturadas tienen un gran número de aplicaciones industriales, incluyendo electrónica, óptica, textil, así como aplicaciones en dispositivos médicos, biosensores y en remediación medioambiental. De hecho, las NP se encuentran con frecuencia comercializadas formando parte de cosméticos y cremas solares (TiO, ZnO), empastes dentales (SiO), sistemas de filtración de agua y catalíticos, células fotovoltaicas (CdS, CdSe, ZnS), etc. (Brayner 2008).

Las propiedades novedosas que muestran las NPs han hecho que sean el objeto de estudio en los últimos años. Las NPs son la aplicación más utilizada en

la NT con dimensiones entre 1 y 100 nm. Poseen propiedades únicas que les dan aplicaciones potenciales en la medicina y la biología. Las NPs de metales nobles como el oro, plata y el cobre, han sido objeto de investigación por sus diversas aplicaciones (Ferrer, 2012). Existen muchos tipos como, ultra finas, aglomerados y agregados, estas se utilizan en los diferentes subsectores de la agricultura. Estas NPs tienen la capacidad potencial de viajar en el interior del organismo que otros materiales o partículas más grandes no pueden hacer. Por lo tanto, se pueden evaluar diversas interacciones de las NPs con fluidos, células y tejidos (Bhattacharyya *et al.*, 2014).

II.7.1. Nanotecnología en la agricultura

La NT promete revolucionar toda la cadena alimentaria, desde la producción hasta el procesamiento y almacenamiento de hortalizas, y otros productos durante postcosecha (Lili *et al.*, 2011). En este aspecto, la NT ofrece un amplio espectro de posibilidades para la elaboración de nuevos materiales con propiedades antimicrobianas.

Los investigadores involucrados con NT están trabajando con las partículas más pequeñas, que prometen mejorar la productividad agrícola. En un proceso continuo donde se hacen esfuerzos para aumentar la eficacia de los fertilizantes aplicados para la restauración de la fertilidad del suelo mediante la liberación de nutrientes (Chinnamuthu y Murugesu, 2009).

Las técnicas nanotecnológicas desempeñan una función fundamental para la producción mundial de alimentos y la seguridad alimentaria. La importancia de las aplicaciones de la NT en la agricultura incluyen fertilizantes para aumentar el crecimiento y rendimiento de la planta, pesticidas para combatir plagas y enfermedades, sensores para monitorear la calidad del suelo y la sanidad de las plantas. Durante la última década se han desarrollado una serie de patentes y productos que incorporan nanomateriales en prácticas agrícolas (por ejemplo, nanopesticidas, nanofertilizantes y nanosensores). Las metas colectivas de todos estos enfoques es mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas, al requerir menos recursos y generando menos residuos indeseados y que con los enfoques convencionales (Servín *et al.*, 2015).

Esta tecnología ofrece la promesa de liberación controlada de productos agroquímicos, de administración dirigida de varias macromoléculas necesarias para mejorar la resistencia a enfermedades de las plantas, la utilización eficiente de nutrientes y crecimiento de las plantas. Procesos como nano encapsulación muestran el beneficio de un uso más eficiente y un manejo más seguro de los plaguicidas con menor exposición al ambiente, que garantice ecoprotección. La eficiencia de absorción y los efectos de las NPs sobre las diversas funciones de crecimiento y procesos metabólicos, varían de manera diferenciada entre las plantas. En concreto, la aplicación de tecnología de NPs en la patología de las plantas, se dirige a los problemas agrícolas específicos en las interacciones planta-patógeno y para proporcionar nuevas formas para la protección de cultivos

(Nair *et al.*, 2010).

II.7.2. Nanopartículas Metálicas de Óxido de Zinc

Se han estudiado a fondo las nanopartículas (NPs) metálicas de óxido de zinc, cobre y hierro, ya sean puras o mezcladas con plata, por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nanofertilizantes y antimicrobiales ya que pueden corregir deficiencias en el crecimiento y desarrollo de la planta.

Se conoce que el Zinc (Zn) es un micronutriente para las plantas, el cual es el segundo metal de transición más abundante en los organismos después del hierro, y el único metal representado en todas las seis clases de enzimas (oxidorreductasas, transferasas, hidrolasas, liazas, isomerasas y ligasas) (Auld, 2001). Este es un micronutriente esencial para los seres humanos, animales y plantas. Las plantas superiores generalmente absorben Zn como un catión divalente (Zn^{2+}), que actúa como co-factor de un gran número de enzimas. Varios investigadores han informado de la esencialidad y el papel del zinc para el crecimiento de las plantas y el rendimiento (Brown *et al.*, 1993). El zinc es necesario para la producción de clorofila, la viabilidad del polen, la fertilización y la germinación; además tiene un papel importante en la producción de biomasa (Kaya y Higgs, 2002).

Las NPs de ZnO han recibido especial importancia en la agricultura debido a que mejoran el crecimiento de las plantas (Liu y Lal, 2015) y 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; Bandyopadhyay *et al.*, 2014).

También 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; He *et al.*, 2011). Su efecto antifúngico se debe en parte porque causan malformación de hifas que provocan la muerte de los hongos (Servin *et al.*, 2015).

II.7.3. Justificación del Uso de Nanopartículas

Los trabajos científicos con nanopartículas más zeolita incorporada al suelo, son muy pocos en México, por eso se requiere incorporar tecnologías innovadoras que coadyuven a hacer un uso más eficiente del agua y los nutrientes, tal y como se puede lograr con la utilización de zeolita y la aplicación foliar de nanopartículas. Lo anterior representa un concepto innovador, sustentable y amigable con el ambiente, que potencialmente pudiera aumentar la relación costo-beneficio para el productor; así mismo, son más fácil de producir en términos de costos de energía y de mayor beneficio para el productor y los agroecosistemas.

III. MATERIALES Y METODOS

III.1. Localización del Sitio

El presente trabajo se realizó en el CIQA (Centro de Investigación en Química Aplicada), en un invernadero de alta tecnología. El CIQA se localiza al noreste de la ciudad de Saltillo, Coah., México. Con las coordenadas geográficas 25°23´ Latitud Norte y 101°59´ Longitud Oeste con una altura de 1600 msnm.

III.2. Características Climáticas del Lugar

El clima en el municipio de Saltillo, es de subtipos semicálidos; al suroeste subtipos semisecos templados y grupos de climas secos y semifríos, en la parte sureste y noreste; la temperatura media anual es de 14 a 18°C y la precipitación media anual en el sur del municipio se encuentra en el rango de los 300 a 400 mm; al centro tiene un rango de 400 a 500 mm y al norte de 300 a 400 mm; con un régimen de lluvias en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y escasas en noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo.

III.3. Imbibición de Semillas

El tiempo de imbibición de semillas en NPs de ZnO se determinó de acuerdo a una curva de imbibición de la especie. Las semillas de chile habanero fueron depositadas en cajas Petri, en cantidades de 25 semillas por caja. Las semillas fueron embebidas con las NPsZnO y con agua destilada. Después de la

imbición fueron sembradas en charolas de 200 cavidades.

III.4. Siembra

Se utilizaron semillas de chile habanero variedad (*Ba'alche*) del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), la siembra se realizó en marzo del 2017, utilizando charolas de poliestireno de 200 cavidades. Se utilizó como sustrato peat moss para la germinación, depositando una semilla por cavidad, la semilla se depositó a 0.5 cm de profundidad. Se estibarón las charolas, cubriéndolas con un plástico negro durante una semana para conservar la humedad del sustrato y favorecer la germinación. Posteriormente se trasplantaron en bolis de siembra que contenían las diferentes mezclas de sustrato (perlita-zeolita), en un invernadero de alta tecnología.

III.5. Trasplante

Se realizó el trasplante el 28 de Mayo de 2017, esto fue 35 días DDS, en bolsas tipo boli color blanco con dimensiones de 100 x 20 x 17 cm. Los bolis se rellenaron con los sustratos zeolita y perlita con los porcentajes mostrados en la Tabla 1. Los bolis se perforaron para permitir el drenaje del exceso de agua. Después de 7 días de trasplante se aplicó solución Steiner al 100%.

Tabla 2. Proporción de los sustratos utilizados para la producción hidropónica de chile habanero.

% Sustrato zeolita	% Sustrato perlita	NPsZnO
100	0	0
0	100	0
30	70	0
50	50	0
70	30	0
100	100	0
0	0	1000
30	30	1000
50	50	1000
70	30	1000
100	0	2000
0	100	2000
30	70	2000
50	50	2000
70	30	2000

Las características de las plántulas trasplantadas eran, altura aproximada de 15 cm con un promedio 4 a 5 pares de hojas verdaderas, cepellón y apariencia sana (Figura 1A). Una vez realizado el trasplante la planta se desarrolló bajo un sistema hidropónico de invernadero, los surcos fueron formados con hileras de bolis sin separación y pasillos de 1.5 m (Figura 1B), colocando 4 plantas por boli en forma de tresbolillo, teniendo un total de 344 plantas en el diseño experimental bifactorial, una vez trasplantadas se les puso el riego colocando un gotero por cada planta.



Figura 1. A) Planta de chile habanero utilizada; **B)** plantas trasplantadas en invernadero.

Las plantas estuvieron en un invernadero de alta tecnología por un periodo de 5 meses. Durante el ciclo del cultivo se realizaron buenas prácticas agrícolas para el manejo del cultivo, siguiendo las normas para el trabajo en invernadero además se aplicó Rally™ 40W de acuerdo a las recomendaciones del proveedor, para el control de enfermedades fúngicas como la cenicilla polvorienta (*Erysiphe cichoracearum*), también se utilizaron extractos orgánicos a base ajo para alejar algunas planas como mosquita blanca, trips.

III.6. Solución Nutritiva

Al inicio del cultivo, en el del trasplante y los 3 primeros días se rego solo con agua. Posteriormente, se prepara la solución nutritiva al 45% y hasta el final del cultivo se utilizó la dosis completa.

III.7. Riegos

Se utilizó una solución nutritiva con las siguientes sales: macronutrientes en base a g/kg $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , HNO_3 , MAP, y micronutrientes en base a mg/kg SO_2K , HSO, H_2PO , la solución se aplicó en el riego durante todo el ciclo del cultivo, ajustando la solución en base al crecimiento y requerimiento del cultivo. Para la fertilización se usó un sistema de fertirriego controlado por timer. Dicho sistema administraba una solución Steiner modificada de acuerdo a las condiciones del agua, con una conductividad eléctrica de 2.0 mmhos/cm y un pH de 6.0, la cual estuvo monitoreada constantemente para mantener los valores mencionados. Para la preparación de solución se excluyó el zinc ya que es el elemento en estudio. El experimento fue llevado a cabo en un invernadero de alta tecnología, el cual contaba con ventilación activa (pared húmeda y ventiladores) manteniendo una temperatura promedio de 24°C dentro del invernadero.

El riego se daba automáticamente en base a la acumulación de watts, cuando se acumulaban los 300 w se activaba el riego por un periodo de 8min, y en los días nublados cuando no se acumulaban los watts requeridos, automáticamente se daban dos riegos uno por la mañana y otro por la tarde, realizando un lavado de sales por semana solo con agua.

III.8. Podas y Tutoreo

Las plantas de chile habanero fueron podadas eliminando las yemas axilares (chupones) cada semana (figura 2A). Además, hubo podas de hojas

senescentes para mejorar la aireación y penetración de luz en la parte inferior de las plantas y finalmente recoger los restos. El tutoreo se realizó utilizando rafia y ganchos de alambre, amarrando a la planta desde la parte inferior (tallo) hasta la parte apical enredando todo el tallo de la planta (figura 2A), los ganchos se colocaron en alambres de la parte de arriba del invernadero y de esta forma sostener a las plantas.



.Figura 2 A) Podas de chupones en plantas de Chile habanero; **B)** Tutoreo de plantas de Chile habanero

III.9. Cosecha

La primera cosecha fue a los 78 días después de la siembra, los frutos cosechados eran contados y pesados por tratamiento (Figura 3). En total se realizaron 11 cosechas durante todo el ciclo del cultivo.



Figura 3. Frutos cosechados de *Capsicum chinense* var. *Bá alche*

III.10. Distribución de los Tratamientos

Se establecieron 15 tratamientos con 4 repeticiones cada uno, en un diseño factorial, en donde el factor A fue la zeolita (0, 30, 50, 70 y 100 % (P/P) y el factor B fue aplicación de NPs ZnO (0, 1000 y 2000 mg L⁻¹). Las variables de respuesta fueron valoradas mediante análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias con nivel de significancia global $\alpha = 0.05$ (Duncan). Utilizando el programa InfoStat 20151 versión 2015. En la tabla 2 se muestra la nomenclatura utilizada para cada tratamiento.

Tabla 3. Distribución de tratamientos aplicados a plantas de *C. chinense* cultivadas en hidroponía bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento	% Sustrato zeolita	% Sustrato perlita	NPsZnO
T1	100	0	0
T2	0	100	0
T3	30	70	0
T4	50	50	0
T5	70	30	0
T6	100	100	0
T7	0	0	1000
T8	30	30	1000
T9	50	50	1000
T10	70	30	1000
T11	100	0	2000
T12	0	100	2000
T13	30	70	2000
T14	50	50	2000
T15	70	30	2000

III.11. Preparación y Aplicación de la Solución con Nanopartículas

Las soluciones con las NPs de ZnO, fueron preparadas con una concentración de 1000 y 2000 mg L⁻¹ en agua destilada y dispersadas con un sonicador Branson 2510 por 30 min (dos tiempos de 15 min). Para su aplicación se utilizó un adherente comercial (Bionex). Se realizaron dos aplicaciones de NPs de ZnO, una a la primera semana después de trasplante y otra a la tercera semana después de trasplante. Las aplicaciones fueron de manera foliar. La primera aplicación fue de 1 ml y la segunda fue de 2 ml por planta. Las NPs que

se ocuparon tenían un promedio de tamaño de 20 nm y tenían forma semi-esférica (Figura 4) fueron adquiridas de Nanostructured and Amorphus Materials Inc.

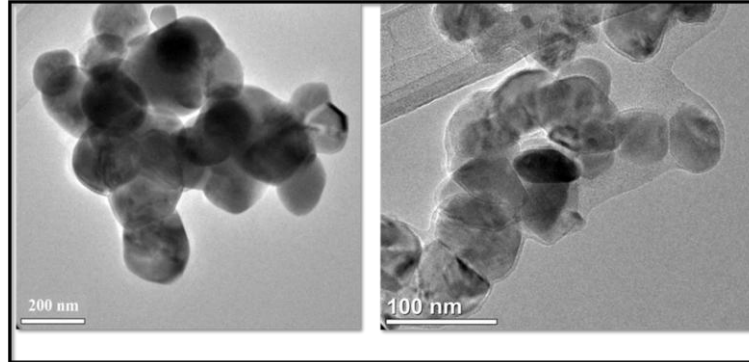


Figura 4. Morfología de las nanopartículas de óxido de zinc obtenida por microscopía electrónica de transmisión (TEM).

III.12. Variables Evaluadas

Se hicieron mediciones semanales de altura, número de hojas, índice de clorofila (Minolta SPAD 502), diámetro de tallo (vernier), peso y número de frutos de las 11 cosechas realizadas. La mediciones finales consistieron en la determinación de área foliar (LI-COR modelo LI-300, Lincoln, Nebraska, USA) pesos frescos de hojas, frutos, tallos y flores, tales muestras se secaron para obtener el peso seco de hojas, frutos, tallo y flores.

III.13. Análisis Estadístico

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con 15 tratamientos y 4 repeticiones. El análisis de las variables fisiológicas se realizó mediante un análisis de varianza y prueba de rango múltiple Duncan ($P \leq 0.05$) con el software estadístico Infostat versión 2017.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Crecimiento

En la Figura 5A se observa el crecimiento de la planta de Chile por el efecto del sustrato, en esta grafica se puede apreciar que la diferencia más evidente se realizó a los 96 DDT, en las plantas cultivadas utilizando como sustrato zeolita al 100 % (T1). La mayor altura de las plantas la presentaron las que crecieron en zeolita (T1), las cuales fueron 9 % superior en tamaño (114.83 cm) comparadas con las que crecieron en perlita (T2, 105.30 cm). Las plantas sometidas a este tratamiento (T1) también presentaron una tendencia a un tallo más grueso (14.15 cm), resultados mostrados en la Figura 2B.

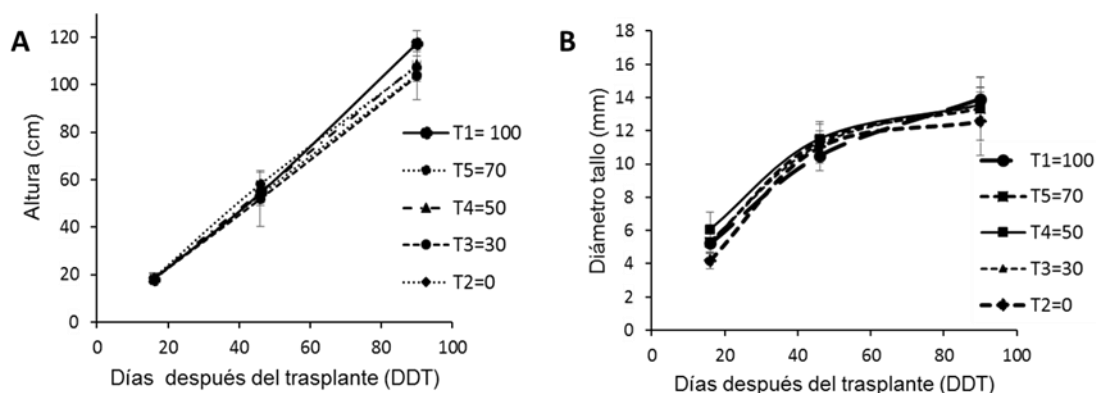


Figura 5. A) Altura de plantas de Chile habanero; **B)** Diámetro de tallo de las Chile habanero a los 16, 46 y 90 días de trasplante.

En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos en las variables fisiológicas evaluadas. Los tratamientos que contenía zeolita en cualquier proporción

mostraron una tendencia con mayor altura de planta. Aunque en el presente trabajo no se encontraron diferencias estadísticas en diámetro de tallo y área foliar. Se indica que la zeolita promueve el rendimiento de los cultivos, mejora la condición del suelo, la absorción de nutrientes y genera un uso eficiente del agua. Estas respuestas se asocian con el incremento en la capacidad de retención de nutrientes del suelo debido a la zeolita, lo que conduce a una mayor disponibilidad de los nutrientes para las plantas, durante un período de tiempo más largo (Lateef *et al.*, 2016). Lo anterior concuerda con un experimento realizado por Quintal-Ortiz y colaboradores (2012), en donde reportan que las plantas de chile habanero con mayor contenido y disponibilidad de humedad en el sustrato, presentaron mejores características en altura de la planta, diámetro de tallo y área foliar. Esto es debido a que se sabe que un déficit de agua restringe el crecimiento celular, lo que se traduce en menor expansión foliar y crecimiento del tallo (Balaguera *et al.*, 2008).

Tabla 4. Efectos fisiológicos del sustrato en plantas de *C. chinense* (var. *Ba'alche*) en condiciones de hidroponía e invernadero a los 96 DDT.

Sustratos (Z/P)	Altura (cm)	Diámetro de tallo (cm)	Índice relativo de clorofila (Spad)	Área foliar (cm) ²
T1 (100/0)	114.83 a	14.15 a	51.08 b	9761.61 a
T2 (0/100)	105.30 b	12.90 a	53.48 ab	9370.61 a
T3 (30/70)	101.95 b	13.62 a	52.94 ab	10272.67 a
T4 (50/50)	104.21 b	13.63 a	54.22 a	8956.78 a
T5 (70/30)	106.11 b	12.92 a	52.98 ab	16965.02 a

Diversos estudios han demostrado que zeolita al incorporarse al suelo reduce los efectos adversos del estrés hídrico debido a la liberación gradual de agua y por promover la síntesis de proteínas (De Campos Bernardi *et al.*, 2013; Pirzad y Mohammadzade, 2014). También se sabe que las zeolitas contienen un alto nivel de absorción, retención y liberación de agua, alta capacidad de intercambio de cationes (CEC) y alta capacidad amortiguadora contra el cambio de pH (Allen y Ming, 1995), en nuestros ensayos no observamos diferencias estadísticas significativas entre las mezclas de sustratos, lo que se pudiera explicar por el efecto de la perlita, de aumentar la aeración en el sustrato (Ghazvini *et al.*, 2007). Ya que la perlita tiene una insignificante capacidad de intercambio catiónico pero alta propiedad capilar, por lo que puede almacenar 3 a 4 veces más agua que su peso, sin embargo, permite la aireación, el cual es un parámetro importante que afecta el crecimiento de las plantas. Siendo el oxígeno un parámetro crítico para el crecimiento y actividad celular. Si la zona de la raíz carece de oxígeno, el crecimiento de las plantas se dañará (Roosta y Afsharipoor, 2012).

Por otro lado, el índice de clorofila se vio incrementado en los tratamientos con mayor proporción de perlita T2 y T4, esto concuerda por lo reportado por Roosta y Afsharipoor (2012) quienes evaluaron mezclas de sustratos con perlita en el crecimiento y desarrollo de cultivo de fresa en hidroponía, en donde encontraron que a el valor más alto de índice SPAD se obtuvo utilizando solo perlita como sustrato, esto se asocia con una mejor asimilación de nitrógeno por el

cultivo.

El análisis de variancia exhibió diferencias significativas en los tratamientos con aplicación foliar de NPs ZnO (Tabla 5). Siendo la interacción de la zeolita con las NPs ZnO a una concentración de 1000 mg L^{-1} (T6) la que incrementó la mayoría de las variables evaluadas. Las plantas crecidas en las condiciones anteriormente mencionadas (T6), alcanzaron una altura de 118 cm las cuales fueron 10.8% de mayor tamaño a las crecidas en perlita (106.43 cm) con la aplicación foliar de NPs ZnO (1000 mg L^{-1}) T6; el diámetro de tallo fue 15.9% más grueso (15.26 mm) comparadas con T7 (13.17), en el área foliar estas plantas obtuvieron un promedio de 11086.05 cm^2 mientras que las del tratamiento T7 solo alcanzaron 9596.17 cm^2 . Sin embargo, la mayor área foliar obtenida fue cuando se utilizó una mezcla de sustratos zeolita:perlita 70:30 (T10) y la aplicación foliar de NPs ZnO (1000 mg L^{-1}), alcanzando valores de 32079.73 cm^2 que es 1.89 veces mayor que sin la aplicación de NPs ZnO (16965.02 m^2 , T5). Lo cual nos indica que las NPs ZnO tienen un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 5. Interacciones de los sustratos y la aplicación foliar de NPs ZnO en el crecimiento de plantas de chile habanero.

Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro de tallo (cm)	Índice relativo de clorofila (Spad)	Área foliar (cm ²)
A x B				
NPs 1000 ppm				
T6 (100/0)	118.55 a	15.26 a	53.18 ab	11086.05 b
T7 (0/100)	106.43 abc	13.17 ab	53.95 ab	9596.17 b
T8 (30/70)	103.60 bc	12.37 ab	55.58 b	11240.66 b
T9 (50/50)	107.13 abc	13.76 ab	54.68 ab	8541.59 b
T10 (70/30)	106.08 abc	11.96 b	54.43 ab	32079.73 a
NPs 2000 ppm				
T11 (100/0)	108.60 abc	13.29 ab	50.20 ab	8733.72 b
T12 (0/100)	103.67 bc	12.86 ab	54.60 ab	8624.04 b
T13 (30/70)	98.55 c	14.93 ab	51.00 ab	11025.89 b
T14 (50/50)	97.10 c	13.56 ab	53.58 ab	9044.34 b
T15 (70/30)	104.70 abc	13.47 ab	52.53 ab	8801.44 b

Los resultados observados pueden ser atribuidos al zinc, por ser uno de los micronutrientes esenciales demandados para la división celular y por su importancia como componente de varias enzimas (Pandey *et al.*, 2010); también está implicado en la síntesis de proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos (Tarafdar *et al.*, 2014). Los resultados obtenidos concuerdan con trabajos efectuados en diversas especies de plantas los cuales confirman que las NPs ZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2015).

Panwar et al., (2012) señalan un mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plántulas de tomate, cuando aplicaron 20 mg L⁻¹ al follaje; además, encontraron altas concentraciones de Zn en las hojas, confirmando con ello que ocurrió la penetración a través de las estomas. Otros estudios realizados reportaron que en semillas de cacahuate y soya la aplicación de NPs ZnO a 1000 mg L⁻¹ promueve la germinación, así como la elongación de raíz y tallo de las plantas (Sedghi *et al.*, 2013; Prasad *et al.*, 2012). Por otro lado, la aplicación foliar de nanoquelato de zinc como fertilizante promovió un incremento significativo en la altura de plantas de algodón (*Gossipium hirsutum*), así como de biomasa seca y contenido de clorofila (Rezaei y Abbasi, 2014). 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).

El 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; Pandey et al., 2010). Existen reportes indicando que las NPs ZnO incrementan el nivel de ácido indolacético (IAA) en raíces y en los brotes apicales, promoviendo de esta forma la velocidad de crecimiento en las plantas (Shyla y Natarajan, 2014).

Por el contrario, en relación a las plantas tratadas con NPs de ZnO a una concentración de 2000 mg L^{-1} se puede observar que hay un efecto negativo en la mayoría de las variables evaluadas de las plantas desarrolladas en estas condiciones (Tabla 4). Debido a que la altura de las plantas crecidas con zeolita y 2000 mg L^{-1} de NPs ZnO (T11) disminuyó 0.91 veces (108.60 cm) comparadas con el mismo sustrato y 1000 mg L^{-1} de NPs de ZnO (118.55 cm) que fue el mejor tratamiento para esta variable. Sin embargo, este efecto fue más marcado en las plantas desarrolladas en perlita ya que fueron las de menor crecimiento, alcanzando una altura de apenas 97.10 cm en promedio (T14). En cuanto al diámetro de tallo podemos observar que las plantas crecidas en perlita (T12) presentaron tallos más delgados (12.86 mm) siendo 0.96 veces menor en comparación a las que crecieron en perlita a 1000 mg L^{-1} (T7). En el área foliar las plantas del T11 disminuyeron el valor 1.2 veces (8733.72 m^2) comparadas con el mismo sustrato y menor concentración de NPs de ZnO (T6; 11086.05 m^2).

Lo anterior concuerda con algunos estudios realizados en otras partes del mundo, los cuales señalan que concentraciones elevadas (1000 mg L^{-1}) causan fitotoxicidad e inhibición de la germinación y crecimiento de las plantas (Kyung-Seok y Kong, 2014; Zhang *et al.*, 2015); mientras que dosis bajas ($< 50 \text{ mg L}^{-1}$) han demostrado efectos significativos en el crecimiento y desarrollo (Prasad *et al.*, 2012), reflejándose en una mayor biomasa seca y área foliar. Los efectos en el crecimiento y desarrollo van a depender del tipo de NPs, del tamaño y de la especie vegetal utilizada ya que Zhao *et al.* (2014) reportaron que plantas de

pepino cultivadas en maceta, obtuvieron incrementos significativos en longitud y biomasa seca de la raíz con la incorporación al suelo de 400 y 800 mg kg⁻¹ de NPs de ZnO, estos investigadores consignan que concentraciones elevadas no afectaron negativamente a las plantas.

IV.2. Frutos

En la variable número de frutos los resultados se muestran en la (Tabla 6), no se observaron diferencias significativas estadísticamente; sin embargo, se puede observar que numéricamente el tratamiento (T5, 219.83 frutos) que fue cultivado en zeolita, perlita 70/30 (v/v), fue superior en 14.4%, comparado con T3 el cual solo produjo 192.08 frutos. Se puede apreciar un mejor rendimiento en los tratamientos T1 donde si utilizó zeolita 100% y T5 con una mezcla de 70/30.

Por otro lado, se puede apreciar una tendencia de mejor rendimiento en producción de chile habanero en las plantas crecidas en zeolita, observando una disminución de esta variable cuando disminuía su proporción con respecto a perlita, aunque todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales.

Tabla 6. Efectos en la producción de *Capsicum chinense* causados por el sustrato a los 96 DDT.

Sustrato (Z/P)	No. frutos	Peso fresco fruto g.	Peso fresco tallo g.	Peso fresco hoja g.	Peso fresco flor g.
T1 (100/0)	200.83 a	1488.33 a	247.92 a	212.67 a	13.83 a
T2 (0/100)	211.70 a	1331.76 a	225.40 a	212.80 a	12.80 a
T3 (30/70)	192.08 a	1348.98 a	214.17 a	197.67 a	14.75 a
T4 (50/50)	207.92 a	1392.01 a	216.42 a	214.50 a	13.42 a
T5 (70/30)	219.83 a	1450.20 a	214.00 a	207.67 a	12.83 a

En el peso fresco de tallo no se encontraron diferencias significativas pero hubo un efecto positivo utilizando zeolita al 100% (T1) teniendo un peso de 247.92 g. El peso fresco de hojas para los sustratos, se muestra efectos positivos destacando la mezcla de zeolita y perlita 50/50 (T4) con un peso de 214.50 g. No se observaron diferencias en biomasa seca en ninguno de los tratamientos, pero se correlaciona con los datos presentados en peso fresco, se tuvo una tendencia de mayor biomasa en las plantas tratadas con zeolita (Anexo 8).

La aplicación de NPs ZnO no exhibió diferencias significativas, para la interacción del sustrato y nanopartículas (Tabla 7). Sin embargo, se observan una tendencia a mayor producción de chile habanero en las plantas con el tratamiento en donde se utilizó zeolita con 1000 mg L^{-1} de NPs ZnO (T6) con una mayor número de frutos (242.75 g), siendo este 1.2 veces mayor con respecto al mismo sustrato sin la aplicación de NPs ZnO (T1); de la misma forma la disminución en la proporción de zeolita con la aplicación foliar disminuyó el número de frutos los que nos está indicando un efecto entre ambos tratamientos.

El rendimiento en producción de chile habanero presento el mismo comportamiento siendo mayor en el T6 siendo 1.07 veces mayor que las plantas sin aplicación de NPs ZnO (T1). Por otro lado, cuando la concentración de NPs de ZnO se incrementó al doble (2000 mg L^{-1}) hubo una tendencia de menor

producción de chile habanero, esto se asocia con las variables antes analizadas en donde el desarrollo de las plantas se vio afectado por esta variable, asociado con una posible fitotoxicidad de la planta. Esto está de acuerdo con los estudios anteriores en los que se enfatizó que se requiere zinc solo en concentraciones apropiadas para componentes estructurales y como cofactores de enzimas, en donde es esencial para el crecimiento normal y desarrollo de plantas.

Tabla 7. Interacciones de los sustratos y la aplicación foliar de NPs ZnO en el rendimiento y peso fresco de plantas de chile habanero.

Tratamientos	No. frutos	Peso fresco fruto g.	Peso fresco tallo g.	Peso fresco hoja g.	Peso fresco flor g.
A x B					
NPs 1000 ppm					
T6 (100/0)	242.75 a	1602.37 a	278.00 a	238.75 a	14.00 a
T7 (0/100)	202.25 a	1295.27 a	236.00 a	216.75 a	14.50 a
T8 (30/70)	248.25 a	1382.46 a	237.50 a	212.25 a	15.75 a
T9 (50/50)	220.00 a	1173.52 a	204.25 a	222.25 a	14.00 a
T10 (70/30)	235.00 a	1412.60 a	200.75 a	200.00 a	12.75 a
NPs 2000 ppm					
T11 (100/0)	171.50 a	1441.85 a	208.75 a	189.75 a	12.00 a
T12 (0/100)	176.00 a	1281.19 a	213.33 a	192.67 a	11.33 a
T13 (30/70)	164.75 a	1306.65 a	202.75 a	188.50 a	14.25 a
T14 (50/50)	165.75 a	1488.42 a	208.00 a	193.75 a	13.25 a
T15 (70/30)	213.25 a	1350.91 a	216.50 a	203.50 a	13.50 a

El peso seco de hojas muestra una diferencia expresada en el sustrato zeolita 100% (T1) siendo mayor con un peso de 39.75 g; y de igual manera para la interacción de sustratos y nanopartículas no se observan diferencias

estadísticas, sin embargo la zeolita muestra el mejor peso seco de plantas (T1) con 39.75 g, también se observa que los tratamientos con zeolita y NPs ZnO promovieron mayor biomasa seca siendo 1.16 veces mayor (46.50 g).

La explicación del mayor crecimiento y producción de materia seca que originan las zeolitas en las plantas, aún no está totalmente clara, pero se puede atribuir a las propiedades que posee la zeolita, como son; su alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), alto grado de retención de agua, así como la mayor absorción y posterior liberación de NH_4 (Al-Busaidi *et al.*, 2008) y otros nutrientes como N, P, K, Mn, Cu y Zn (Ozbahce *et al.*, 2014), los cuales al incorporarse en el suelo promueven una mejora significativa en las propiedades físicas y químicas del mismo (Campos-Bernardi *et al.*, 2010), lo que promueve una mayor síntesis de aminoácidos, proteínas y otros compuestos nitrogenados en las plantas, los que finalmente originan mayor crecimiento (Ghannad *et al.*, 2014).

Se ha señalado que de todos los tipos de zeolitas, la clinoptilolita y la modernita se distinguen por su utilidad en la agricultura, debido a que al entrar en contacto con el amonio del medio, lo retienen en su estructura interna y externa reduciendo las pérdidas de nitrógeno por volatilización y funcionando entonces como un fertilizante nitrogenado de lenta liberación (Yolcu *et al.*, 2013). Se ha reportado que las zeolitas cargadas con NH_4^+ tienen la capacidad de aumentar la solubilización de minerales fosfatados, por lo tanto, mejoran la absorción de P y el rendimiento de los cultivos.

Los estudios realizados para comprobar la solubilidad y el intercambio catiónico de mezclas de roca fosfórica, NH_4^+ y K saturado en clinoptilolita, revelaron que las mezclas de zeolita y roca fosfórica tienen el potencial de proporcionar una fertilización de liberación lenta para las plantas (Bansiwal *et al.*, 2006). Por su parte Mihajlović *et al.* (2014), mencionan que la zeolita actúa como un acarreador de nutrientes como NH_4 , como un mejorador de suelos, promueve la disolución de fosfatos y libera lentamente los fertilizantes cuando las plantas lo requieren. Lo anterior puede explicar el crecimiento observado en el este experimento.

Al analizar los resultados derivados de la aplicación de las NPs de ZnO, existen diferentes reportes que este tipo de NPs pueden utilizarse como nano fertilizantes ya que mejoran el crecimiento y rendimiento de cereales como arroz, maíz y trigo (Jyothi y Hebsur, 2017). La aplicación de nano fertilizante en base a NPs de Fe mejoró la altura de la planta, el contenido de clorofila y el número espiguillas en el arroz, las magnitudes de aumento sobre el control fueron 3.6%, 2.72%, 9.10%, 9.10% y 15.42%, respectivamente. La exposición de garbanzo a las NPs ZnO (0, 25, 50, 75, 100 y 150 mg L^{-1}) causó cambios significativos en la longitud de raíces y brotes, dando como resultado un incremento en la biomasa. Además, aumentaron la materia seca del brote y los índices del área foliar en un 63.8% y 69.7% respectivamente (Burman *et al.*, 2013).

Por otra parte, puede señalarse que la ausencia de respuesta significativa

a los tratamientos con zeolita, puede adjudicarse al uso de dosis de clinoptilolita comparativamente muy bajas a las usadas o mezclas recomendadas en otros experimentos (González Camarillo et al., 2012).

V. CONCLUSIONES

Al evaluar a la zeolita clinoptilolita para su posible uso en un sistema hidropónico para el cultivo de Chile habanero, se encontraron diferencias significativas, mostrando que la Zeolita no influyó sobre las variables bajo estudio.

Estos resultados se enfatizaron cuando se aplicó el zinc a nanoescala, ya que a dosis bajas pueden ser efectivo para mejorar el rendimiento y producción de biomasa, bajo las condiciones de hidroponía e invernadero.

Las nanopartículas de óxido de zinc favorecen el crecimiento de las plantas, ya que las plantas al ser tratadas con nanopartículas tienden a tener una mejor área foliar, aunque no influyeron en mejores rendimientos.

VI. LITERATURA CITADA

- Al-Busaidi, A., Yamamoto, T., Inoue, M., Eneji, E.A., Mori, Y., Irshad, M. 2008. Effects of zeolite on soil nutrients and growth of barley following irrigation with saline water. *J. Plant Nutrition*. 31: 1159-1173.
- Alpizar Antillón, L. (2004). *Hidroponía: Cultivo sin tierra: Elementos básicos para desarrollar la técnica simple de cultivar plantas sin tierra en pequeños espacios*. Tecnología de Costa Rica.
- Alvarado, R., Solera, F., y Vega-Baudrit, J. 2014. Síntesis sonoquímica 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.
- Allen, E. R., & Ming, D. (1995). Recent progress in the use of natural zeolites in agronomy and horticulture. *Natural zeolites*, 93, 477-490.
- Auld, D. S. (2001). "Zinc coordination sphere in biochemical zinc sites". *Biometals*, 14:271-313.

- Balaguera, H. E., Herrera, J. G. Á., & Rodríguez, J. D. (2008). Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 246.
- Bansiwal, A.K., Rayalu,S.S., Labhasetwar, N.K., Juwarkar, A.A. and Devotta, S. (2006). Surfactant-modified zeolite as a slow release fertilizer for phosphorus. *J. Agric. Food Chem.* 54: 4773-4779.
- Brayner R (2008) The toxicological impact of nanoparticles *Nanotoday* 3:1-2, 48-55
- Borges-Gómez, L., C. Moo-Kauil, J. Ruíz-Novelo, M. Osalde-Balam, C. González-Valencia, C. Yam-Chimal, F. Can-Puc. 2014. Suelos destinados a la producción de chile habanero en Yucatán: Características físicas y químicas predominantes. *Agrociencia* 48: 347-359.
- Brown, P. H., I. Cakmak, and Q. Zhang. (1993). "*Forms and function of zinc in plants*". In: *Zinc in Soil and Plants*, ed. A. D. Robson, pp. 93-106. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Briceño, S. y del Castillo, H. 2008. Reducción catalítica de NOx con Pt soportado sobre zeolitas MFI modificadas con Cu, Co, Fe, Mn. *Avances en Química*. Disponible en: ISSN 1856-5301. Consultado 7 Mar., 2011.
- Burman, U., Saini, M., & Kumar, P. (2013). Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95(4), 605-612.
- Campos-Bernardi, A.C., de Mello-Monte, B.M., Perdigão-Paiva, R.P., Werneck, C.G., Haim, P.G., de Souza-Barros, F. 2010. Dry matter production and nutrient accumulation after successive crops of lettuce, tomato, rice, and andropogongrass in a substrate with zeolite. *R. Bras. Ci. Solo.* 34: 435-442.

- Castilla, N., & Prados, N. C. (2007). Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Mundi-Prensa Libros.
- Ditta, A., Arshad, M., & Ibrahim, M. (2015). Nanopartículas en la producción de cultivos agrícolas sostenibles: aplicaciones y perspectivas. En Nanotecnología y Ciencias de las plantas (pp. 55-75). Springer International Publishing.
- Dreher KL (2004) Impacto sobre la salud y el medio ambiente de la nanotecnología: evaluación toxicológica de las nanopartículas fabricadas. *Toxicol Sci* 77: 3-5
- Durán, J. M., Martínez, E., & Navas, L. M. (2000). Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía (I). *Vida rural*, 7(101), 40-43.
- González, TE; Gutiérrez, L; Contreras, F. 2006. El chile habanero de Yucatán. Usos culinarios tradicionales del chile habanero. Ciencia y Desarrollo. El conocimiento a tu alcance. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. Consulta 15 en el 2007. Disponible en <http://www.conacyt.mx/comunicacion/revista/195/Articulos/Chilehabanero/Habanero00.html>
- Ghannad, M., Ashraf, S., Alipour, Z.T. 2014. Combined effects of zeolite, humic acid and potassium sulphate on yield and qualitative characters of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Intl. J. Farm. Alli. Sci.* 3: 669-674.
- Ghazvini, R. F., Payvast, G., & Azarian, H. (2007). Effect of clinoptilolitic-zeolite and perlite mixtures on the yield and quality of strawberry in soil-less culture. *International Journal of Agriculture & Biology*, 9, 885-888.

- Grillo, R., Abhilash, P. C., & Fraceto, L. F. (2016). Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 16(1), 1231-1234.
- González Camarillo, M., Gómez Montiel, N. O., Muñiz Espíritu, J., Valencia Espinosa, F., Gutiérrez Guillermo, D., & Figueroa López, H. O. (2012). Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizantes en el estado de Guerrero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1129-1144.
- Guantes Ruiz, J. (2006). *El Mercado de los Invernaderos en México*, Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México.
- Gutiérrez-Praena D (2009) Evaluación toxicológica de nanotubos de carbono funcionalizados con ácido carboxílico en la línea celular intestinal humana Caco-2 como estudio previo a su potencial utilización médica. Trabajo fin de Máster Ciencia, Tecnología y Uso Racional del Medicamento, Universidad de Sevilla
- Harland, J., Lane, S., y Price, D. (1997, mayo). Experiencias adicionales con zeolita reciclada como sustrato para el cultivo de pimiento dulce. En el Simposio Internacional sobre Cultivo de Medios e Hidroponía 481 (pp. 187-196).
- Jakkula, V. S. 2005. Synthesis of zeolites and their application as soil amendments to increase crop yield and potentially act as controlled release fertilizers. Thesis. University of Wolverhampton, U.K. 273 p.
- Jalali, M., Ghanati, F., Modarres-Sanavi, A. M., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2017). Physiological effects of repeated foliar application of magnetite nanoparticles on maize plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*.

- Kaya, C., and D. Higgs. (2002). "Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L) culture at low zinc". *Scientific Horticulture*, 93:53-64.
- Korbekandi, H., Chitsazi, M. R., Asghari, G., Bahri Najafi, R., Badii, A., Iravani, S. (2015). "Green biosynthesis of silver nanoparticles using *Quercus brantii* (oak) leaves hydroalcoholic extract". *Pharmaceutical biology*, 53:807-812
- Kyung-Seok, K.S., y Kong, I. C. (2014). Toxic effects of nanoparticles on bioluminescence activity, seed germination, and gene mutation. *Applied microbiology and biotechnology*, 98(7), 3295-3303.
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M. N., & Saleem, M. (2016). Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183.
- Lili, H., Liu, Y., Mustapha, A., Lin, M. 2011. Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. *Microbiological Research*, 166: Pages 207–215.
- 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.
- Maggi, C. A. (1992). Therapeutic potential of capsaicin-like molecules: studies in animals and humans. *Life sciences*, 51(23), 1777-1781.

- Nuruzzaman, M.; Rahman, M.M.; Liu, Y.; Naidu, R, 2016. Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. Journal of agricultural and food chemistry. Pp 1447 – 1483.
- Ozbahce, A., Tari, A.F., Gönülal, E., Simsekli, N., Padem, H. 2014. The effect of zeolite applications on yield components and nutrient uptake of common bean under water stress. Arch. Agronomy Soil Sci. 61: 615-626.
- Pandey, A. C., S. Sanjay, S., & S. Yadav, R. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. Journal of Experimental nanoscience, 5:488-97.
- 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
- Pirzad, A., & Mohammadzade, S. (2014). The effects of drought stress and zeolites on the protein and mineral nutrients of *Lathyrus sativus*. International Journal of Biosciences (IJB), 4(7), 241-248.
- Prasad, R.; Kumar, V.; Prasad, K.S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. African Journal of Biotechnology. Pp 705 – 713.
- Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., & Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of plant nutrition, 35(6), 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.

Rezaei, M., & Abbasi, H. (2014). Foliar application of nanochelate and non-nanochelate of zinc on plant resistance physiological processes in cotton (*Gossipium hirsutum* L.). *Iranian Journal of Plant Physiology*, 4(4), 1137-1144.

Roosta H.R.& Afsharipoor S. (2012). Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Advances in Environmental Biology*, 6(2), 543-555.

Resh, H.M. 1991. *Hydroponic food production*. 4th edition. Woodbridge Press Publishing Company. Santa Barbara, Ca, USA

Ruiz-Bello, R. 2009. Potencial productivo y limitantes para la producción del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en la zona centro del estado de Veracruz. Tesis de Doctorado, Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz, México. 143 pp.

SAGARPA, S. (2013). Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Base de datos en línea. Consultado en septiembre del.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2012. Plan rector del cultivo de chile en Campeche. SAGARPA-Gobierno del Estado de Campeche-INCA Rural, San Francisco de Campeche, Campeche, México. 38 pp.

Sedghi, M., Hadi, M., & 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.

- Shyla, K. K., & Natarajan, N. (2014). Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(9), 1376-1381.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesca). Anuario estadístico de la producción agrícola. Gobierno Federal. México. (En línea). Consultado 19 septiembre 2012. Disponible en LINEA [<http://www.siap.gob.mx>]
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Firoz, M., & Al-Khaishany, M. Y. (2015). Role of nanoparticles in plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 19-35). Springer International Publishing.
- Soria, F. M., A. Trejo, J. Tun, R. Saldívar (2002), *Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (Capsicum chinense Jacq.)*, Secretaría de Educación Pública/ SEIT/Instituto Tecnológico Agropecuario de Conkal, Yucatán, pp. 1-21.
- Tarafdar, J. C., Raliya, R., Mahawar, H., & Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3(3), 257-262.
- The Royal Society. (2004) *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. Science Policy Section. Londres, Inglaterra.
- Tsitsishvili G. V.; Kirov G. N.; Filizova L. D.; (1992) *Natural zeolites*. 278-287. New York. Ellis Horwood.
- Tsitsishvili G. V.; Kirov G. N.; Filizova L. D.; (1992) *Natural zeolites*. 278-287. New York. Ellis Horwood.

- Vergara, D., Lozada-Requena, I., & Aguilar, J. (2006). Efecto de la capsaicina sobre la producción de TNF- α en células mononucleares: estudio piloto. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 23(1), 52-55.
- Yolcu, H., Seker, H., Kerim, Gullap, M. and Lithourgidis, A. (2011). Application of cattle manure, zeolite and leonardite improves hay yield and quality of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) under semiarid conditions. *Australian Journal of Crop Science*. 5: 926-931.
- Zhang, D., Hua, T., Xiao, F., Chen, C., Gersberg, R. M., Liu, Y., & Tan, S. K. (2015). Phytotoxicity and bioaccumulation of ZnO nanoparticles in *Schoenoplectus tabernaemontani*. *Chemosphere*, 120, 211-219.
- Zhao, L., Peralta-Videa, J. R., Rico, C. M., Hernandez-Viezcas, J. A., Sun, Y., Niu, G., & Gardea-Torresdey, J. L. (2014). CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(13), 2752-2759

VII. ANEXOS

Anexo 1. Peso seco de plantas de chile habanero

Sustrato (Z/P)	Peso seco fruto g.	Peso seco tallo g.	Peso seco hoja g.	Peso seco flor g.
T1 (100/0)	67.58 a	47.58 a	39.75 a	1.92 a
T2 (0/100)	72.60 a	43.10 a	37.70 a	1.80 a
T3 (30/70)	65.17 a	41.42 a	36.67 a	2.25 a
T4 (50/50)	72.00 a	42.25 a	39.67 a	2.00 a
T5 (70/30)	72.75 a	42.00 a	38.08 a	1.83 a
A x B				
NPs 2000 ppm				
T6 (100/0)	81.75 a	54.50 a	46.50 a	1.75 a
T7 (0/100)	73.75 a	45.50 a	38.00 a	2.00 a
T8 (30/70)	78.25 a	47.50 a	42.00 a	2.50 a
T9 (50/50)	81.00 a	41.00 a	38.75 a	2.25 a
T10 (70/30)	66.50 a	39.25 a	36.25 a	1.50 a
NPs 2000 ppm				
T11 (100/0)	60.25 a	38.50 a	33.00 a	1.75 a
T12 (0/100)	53.00 a	40.33 a	33.67 a	1.67 a
T13 (30/70)	57.00 a	38.75 a	33.25 a	1.75 a
T14 (50/50)	43.75 b	37.75 a	36.75 a	1.75 a
T15 (70/30)	75.25 a	42.25 a	37.50 a	2.00 a

Anexo 2. Análisis de varianza para la variable altura de planta, primer muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- valor
MODELO	14	178.15	12.73	5.11	<0.0001
TRATAMIENTO	14	178.15	12.73	5.11	<0.0001
ERROR	105	261.56	2.49		
TOTAL	119	439.71			

Anexo 3. Comparación de medias para la altura de la planta, primer muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	18.18	cde
2	17.96	cde
3	18	cde
4	18.73	cd
5	18.49	cd
6	20.96	a
7	20.46	ab
8	20.68	ab
9	19.35	abc
10	18.99	bcd
11	18.38	cd
12	16.46	e
13	17.33	de
14	18.46	cd
15	17.59	cde

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).

Anexo 4. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo, primer muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- valor
MODELO	14	863.09	61.655	0.94	0.5156
TRATAMIENTO	14	63.09	61.655	0.94	0.5156
ERROR	105	6859.85	65.33		
TOTAL	119	7722.94			

Anexo 5. Comparación de medias para el diámetro de tallo, primer muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	5.24	a
2	14.18	a
3	5.37	a
4	12.17	a
5	5.31	a
6	5.01	a
7	5.07	a
8	5.57	a
9	5.81	a
10	5.39	a
11	5.46	a
12	5.2	a
13	5.43	a
14	5.62	a
15	5.48	a

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).

Anexo 6. Análisis de varianza para la variable índice relativo de clorofila, primer muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- valor
MODELO	14	328.06	23.43	1.7	0.0654
TRATAMIENTO	14	328.06	23.43	1.7	0.0654
ERROR	105	1443.3	13.75		
TOTAL	119	1771.36			

Anexo 7. Comparación de medias para el índice relativo de clorofila, primer muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	46.18	ab
2	47.13	abc
3	48.91	abc
4	49.85	bc
5	47.43	abc
6	44.67	a
7	48.28	abc
8	50.91	c
9	49.38	bc
10	46.36	ab
11	48.21	abc
12	50.59	bc
13	48.91	abc
14	49.26	bc
15	48.61	abc

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).

Anexo 8. Análisis de varianza para la variable altura de planta, segundo muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- valor
MODELO	14	899.95	64.28	2.14	0.0152
TRATAMIENTO	14	899.95	64.28	2.14	0.0152
ERROR	105	3157.55	30.07		
TOTAL	119	4057.5			

Anexo 9. Comparación de medias para la altura de la planta, segundo muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	54.34	abcde
2	53.66	abcde
3	51.91	abcd
4	54.99	anbce
5	57.98	cde
6	59.78	e
7	58.7	de
8	55.15	abcde
9	53.46	abcde
10	55.98	abcde
11	56.45	bcde
12	52.68	abcd
13	50.75	ab
14	49.78	a
15	53.9	abcde

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).

Anexo 10. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo, segundo muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- Valor
MODELO	14	23.79	1.7	1.28	0.235
TRATAMIENTO	14	23.79	1.7	1.28	0.235
ERROR	105	139.89	1.33		
TOTAL	119	163.8			

Anexo 11. Comparación de medias para el diámetro de tallo, segundo muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	10.51	ab
2	11.03	ab
3	11.2	ab
4	11.53	ab
5	11.36	ab
6	10.52	ab
7	10.73	ab
8	11	ab
9	10.76	ab
10	10.2	b
11	11.79	b
12	10.62	ab
13	11.11	aba
14	11.04	ab
15	11.71	a

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).

Anexo 12. Análisis de varianza para la variable índice relativo de clorofila, segundo muestreo.

F.V	GL	SC	CM	F	P- Valor
MODELO	14	150.47	10.75	1.3	0.2186
TRATAMIENTO	14	150.47	10.75	1.3	0.2186
ERROR	105	866.65	8.25		
TOTAL	119	1017.12			

Anexo 13. Comparación de medias para el índice relativo de clorofila, tercer muestreo.

Tratamiento	Media	DUNCAN Agrupamiento
1	56.59	ab
2	54.61	b
3	55.44	ab
4	55.91	ab
5	58.31	a
6	57.88	ab
7	55.23	ab
8	56.51	ab
9	57.18	ab
10	54.9	ab
11	56.88	ab
12	54.5	b
13	55.96	ab
14	57.21	ab
15	55.9	ab

Nota: Medias con literales diferentes tienen diferencia estadística (Duncan $\alpha = 0.05$).