

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



**Crecimiento y desarrollo de plantas de *Solanum lycopersicum*
por efecto de nanopartículas metálicas y sustrato zeolítico en
condiciones de agricultura protegida**

Por:

GREGORIO ANTONIO GALLARDO CARDOSO

Tesis:

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2016

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Crecimiento y desarrollo de plantas de *Solanum lycopersicum*
por efecto de nanopartículas metálicas y sustrato zeolítico en
condiciones de agricultura protegida

Por:

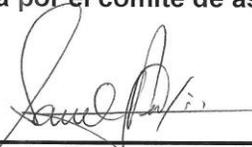
GREGORIO ANTONIO GALLARDO CARDOSO

Tesis:

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:



M.C. Víctor Samuel Peña Olvera
Asesor principal



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar
Asesor



Dr. Bulmaro Méndez Argüello
Asesor
Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Saltillo, Coahuila México, noviembre, 2016.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES

Al Sr. Gabino Gallardo Pérez y la Sra. María Cardoso Jiménez

Por darme la vida, gracias a ustedes por educarme de una manera respetuosa y aprender a valorar las cosas, guiándome al buen camino positivo, por dar los consejos sabios y el apoyo incondicional que me dieron durante este trayecto de mi vida, he logrado llegar hasta aquí y convertirme lo que soy, cumpliendo mi meta en la etapa de mi vida profesional gracias a ustedes.

A MIS HERMANOS(AS): Cecilia, Rogaciana, Librada, Humberto, Florencio, Eugenio, Ignacio, Sara y Bernardino.

Gracias a ustedes por los grandes apoyos que me brindaron durante mi etapa del estudio profesional, en lo moral y económico, por darme el ejemplo a seguir adelante a pesar de los problemas que se presenta y por tener confianza en mí.

A MIS SOBRINOS: Jonathan, Santiago Edgar, Benjamín, Rufino y Jacobo.

Gracias por convivir durante la etapa de niñez y por el apoyo que me brindaron durante la etapa de mi carrera profesional en las buenas y las malas situaciones.

A MIS CUÑADAS(OS):

Gracias Por el apoyo moral, económico y la confianza que tienen en mí, que me brindaron durante mi etapa de mi vida profesional.

Gracias a Sofía por apoyarme en las buenas y en las malas situaciones y seguir adelante durante mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por esta gran oportunidad de vivir, por cuidarme, darme buena salud y por este trayecto de mi vida profesional, a cumplir mi meta y ser lo que soy ahora.

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO campus Saltillo, por darme la gran oportunidad de estudiar una carrera profesional, de adquirir conocimientos y hacer en alto a mi ALMA TERRA MATER, me siento orgulloso de ser un buitre por siempre.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar por aceptarme y/o formar parte de su proyecto de investigación de Fronteras de la Ciencia del CONACYT, por el apoyo brindado dentro del lapso del trabajo y los conocimientos adquiridos.

Al Dr. Bulmaro Méndez Argüello por su gran apoyo durante los trabajos de investigación y compartir su conocimiento.

Al M.C. Víctor Samuel Peña Olvera y Lic. Quim. Brenda Berenice García Berlanga por formar parte de mi comité de asesores, por su tiempo de empeño durante la revisión de mi tesis.

A mis amigos y compañeros de mi carrera por el apoyo que me brindaron en las buenas y malas situaciones y las experiencias compartidas durante el lapso de 5 años; a José Andrés, Samuel, Luis Gerardo, Reyna, Limber, Liliana, Francisco Javier, Jorge Enrique, Florina, Juan de Jesús, Ivon, Salvador, Silvano, Dulce Marisol, Andrea, Diana, Dulce María, Jesús, Erik.

A mis compañeros del internado; a José Luis, Rolando, Moisés, Gustavo, Joan, Alejandro, Cristian, por sus convivencias, el apoyo que me brindaron durante 4 años de estancia.

A mis paisanos por el apoyo que me proporcionaron y las convivencias; a Eloy, Godofredo, Víctor, Tsu meyj, Cesar, Leticia.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVO GENERAL.....	3
	2.1 Objetivos específicos	3
III.	HIPÓTESIS	3
IV.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
	4.1 Origen e importancia del cultivo de tomate	4
	4.2 Agricultura protegida	5
	4.3 Sustratos	6
	4.3.1 Características y propiedades de sustratos	6
	4.4 Sustrato de peat moss	7
	4.5 Sustrato de perlita	7
	4.6 Sustrato zeolítico.....	7
	4.6.1 Historia y su uso potencial	7
	4.7 Nanotecnología	11
V.	METODOLOGÍA.....	18
	5.1 Ubicación del sitio experimental.....	18
	5.2 Bioensayo I	18
	5.2.1 Distribución de los tratamientos	18
	5.2.2 Establecimiento del experimento	19
	5.2.3 Aplicación de nanopartículas	19
	5.2.4 Evaluación de variables	20
	5.3 Bioensayo II	21

5.3.1 Distribución de los tratamientos	21
5.3.2 Establecimiento del experimento	21
5.3.3 Evaluación de las variables.....	22
5.4 Análisis estadístico.....	23
VI. RESULTADOS.....	24
6.1 Bioensayo I. Efecto de la aplicación de NPs de óxido de fierro a plántulas del cultivo de tomate en condiciones bajo invernadero.	24
6.2 Bioensayo II. Efecto de mezcla de sustrato zeolítico con perlita en diferentes proporciones en cultivo de <i>Solanum lycopersicum</i>	30
VII. DISCUSIÓN	38
VIII. CONCLUSIONES.....	42
IX. BIBLIOGRAFÍA	43
X. ANEXOS	50

ÍNDICE DE CUADRO

Cuadro 1. Características físicas y químicas de algunas especies de zeolita.....	9
Cuadro 2. Distribución de tratamientos que se evaluaron para promoción del crecimiento en plantas de <i>Solanum lycopersicum</i> por efecto de nanopartículas de hierro con 8 repeticiones por tratamiento.	18
Cuadro 3. Solución nutritiva de Steiner para cultivo de tomate, usando los siguientes fertilizantes comerciales para la nutrición de la planta, donde se suprimió el quelato de hierro para fines efecto de nanopartículas de óxido de hierro.	19
Cuadro 4. Distribución de los tratamientos con diferentes proporciones de mezcla de sustrato zeolita/perlita que se evaluaron para crecimiento y rendimiento del cultivo tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) con 6 repeticiones por tratamiento	21
Cuadro 5. Variables fisiológicas en comparación entre las medias de cada tratamiento por el efecto de nanopartículas de óxido hierro.....	24
Cuadro 6. Análisis estadísticos de variables comparación con las medias de los datos	26
Cuadro 7. Análisis estadísticos de fotosíntesis y conductancia estomática comparación con las medias de los datos	27
Cuadro 8. Variables analizadas con comparaciones medias estadísticas	30
Cuadro 9. Variables con análisis estadístico comparando las medias.....	32
Cuadro 10. Variables con análisis estadístico comprando las medias.....	33

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Estructura interna de zeolita. (Tomado de: Paredes et al, 2013).	8
Figura 2. Aplicaciones potenciales de la NT y de las nanopartículas en la agricultura (Lira, et al., 2016).	15
Figura 3. (A). Esquema que ilustra la aplicación de nanopartículas al follaje de las plantas. (B) Cuando son absorbidas a través de los estomas se translocan o transportan vía floema. (C) Cuando se aplican a la zona radicular su translocación a larga distancia es principalmente por el apoplasto del tejido conductivo del xilema (Lira, et al., 2016).	16
Figura 4. Comparación de las medias de cada una de las variables fisiológicas del efecto de nanopartículas de óxido de hierro.....	25
Figura 5. Tendencia de fotosíntesis del cultivo de tomate durante parte del día.....	28
Figura 6. Tendencia de conductancia estomática del cultivo de tomate durante el día.	28
Figura 7. Efectos de mezcla de sustrato zeolítico con perlita comprando con medias estadísticas.....	31
Figura 8. Fluctuaciones de fotosíntesis del cultivo de tomate durante el día en casa sombra.....	34
Figura 9. Fluctuaciones de conductancia estomática del cultivo de tomate durante el día en casa sombra	34
Figura 10. A) planta de tomate con sustrato de perlita, B) planta de tomate con sustrato de zeolita.	35
Figura 11. Unidades de pH y Conductividad eléctrica (dS/m) de solución nutritiva de la entrada de en el cultivo de tomate.	35
Figura 12. Volumen de entrada y drenaje de solución nutritiva en la maceta.	36
Figura 13. pH y Conductividad eléctrica del drenaje en cada tratamiento en cultivo de tomate.....	37
Figura 14. Invernadero de media tecnología en donde se realizó el bioensayo I.....	50

Figura 15. Aplicación de nanopartículas de óxido de hierro por dos vías A) base del tallo, B) foliar.....	50
Figura 16. Comparaciones de plantas representativas de cada tratamiento.....	50
Figura 17. Evaluación de área foliar de las plantas de tomate.....	51
Figura 18. Casa sombra donde se realizó el bioensayo II.....	51
Figura 19. Plantas de tomate (<i>solanum lycopersicum</i>) establecido en macetas sobre en vigas metálicas en casa sombra. A) inicio del ciclo, B) final del ciclo de producción.....	51
Figura 20. A) Medición de fotosíntesis, B) cosecha de tomate.....	52
Figura 21. Toma panorámica en la que se puede apreciar las plantas representativas de cada tratamiento.....	52

RESUMEN

Crecimiento y desarrollo de plantas de *Solanum lycopersicum* por efecto de nanopartículas metálicas y sustrato zeolítico en condiciones de agricultura protegida

El primer trabajo del bioensayo fue desarrollado en los meses de Junio a Julio de 2016 en un invernadero con tecnología media y el segundo fue desarrollado durante los meses de Julio a Octubre de 2016 en una casa sombra, cuyas instalaciones se encuentran en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, Coahuila, México.

En el primer bioensayo se establecieron siete tratamientos, en donde, cada uno con ocho repeticiones en un diseño completamente al azar, utilizando el sustrato *peat moss* o turba y perlita en proporciones de 70:30 en relación v:v en macetas de 1 L de capacidad. Las plántulas de tomate se trasplantaron el 6 de Junio y se terminó el experimento el 7 de Julio del 2016.

El propósito de las aplicaciones de micropartículas (MCs) y nanopartículas (NPs) fue evaluar el crecimiento, desarrollo y producción de biomasa del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*), en donde las aplicaciones de micropartículas de sulfato de hierro a concentraciones de 25 y 50 ppm fueron aplicadas en la base del tallo, esto con el fin, de que haya una translocación por vía xilema, y otras aplicaciones de NPs de óxido de hierro a concentraciones de 25 y 50 ppm, aplicadas por las dos vías: foliar y en la base del tallo.

Las mediciones de las variables que se consideraron fueron fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, altura, diámetro, número de hojas, índice relativo de clorofila, número de botones, biomasa fresca y seca, efectuándose las mediciones cada ocho días, y las variables de biomasa fresca y seca se

determinaron al final del experimento a través de la destrucción completa de la planta.

En el segundo bioensayo se inició el 10 de junio del 2016, iniciando con la siembra de semilla en cada una de las cavidades con que cuenta la charola, posteriormente se trasplantó en una maceta

Para trasplantar las plántulas de tomate, se diseñaron los tratamientos de la siguiente manera; fueron siete tratamientos con seis repeticiones con un diseño completamente al azar, cuyos sustratos utilizados fueron zeolita (Z) y perlita (P), en diferentes proporciones volumétricas de P:Z 100:0; P:Z 0:100; P:Z 30:70; P:Z 40:60; P:Z 50:50; P:Z 60:40 y P:Z 70:30, en macetas con capacidad de 5 litros, cabe destacar que el trasplante fue realizado el 27 de Julio del 2016, culminándose el experimento el día 14 de Octubre del mismo año.

El objetivo del segundo bioensayo fue evaluar el sustrato de zeolita sobre su efecto en las variables fisiológicas del cultivo de tomate, se realizaron mediciones con un intervalo de 15 días durante el tiempo, por lo cual, algunas de las variables se efectuaron al finalizar el experimento, haciendo muestreos destructivos de la planta (biomasa fresca y seca).

La valoración de las variables se realizó con el análisis de varianza y comparación de medias (Duncan $p \leq 0.05$), con el programa InfoStat versión 2016.

De acuerdo a los resultados del análisis estadístico se mostraron efectos favorables en la tendencia numérica por la aplicación de NPs de óxido de fierro por las dos vías de aplicación.

En el bioensayo dos, se observaron resultados favorables por el uso de zeolita en las variables evaluadas, por lo cual, hubo efecto positivo con 30 y 50% de zeolita adicionada a las mezclas de sustrato. Estas proporciones promovieron mayor crecimiento y rendimiento con respecto al uso del sustrato de perlita.

Palabras clave: Tomate, nanotecnología, nanopartículas, óxido de hierro sustratos, zeolita.

Gregorio Antonio Gallardo Cardoso, correo: goyog03@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Se conoce que los nutrientes pueden perderse, por medio del lavado, transformación o lixiviación. La aplicación inadecuada de los fertilizantes induce a la contaminación del suelo y agua, por lo que, el reto hoy en día es reducir estos problemas. Descubrir fuentes y usos eficientes de energía y fertilizantes, así como beneficiar la retención de humedad del suelo, específicamente en las zonas semiáridas y áridas (Carrillo *et al.*, 2014).

Mejorar la calidad de los agroquímicos para el control de plagas y enfermedades y que estos sean menos dañinos a los humanos y el medio ambiente, así como, a los procesos de manejo de poscosecha y procesamiento de la producción, y en conjunto de todas estas aplicaciones mencionadas son propuestas para la nanotecnología a futuro en el campo agrícola (Carrillo *et al.*, 2014)).

La agricultura es la base para la alimentación, sin embargo, se ha dado poca aplicación de la nanotecnología (NT) en esta área para mejorar los sistemas de producción o disminuir las mermas ocurridas en la cadena productiva. Pero durante los últimos años la aplicación de esta tecnología novedosa se ha inclinado hacia la agricultura para satisfacer las necesidades del hombre, así como, mejorar la fertilidad del suelo, reducción de la degradación y la mitigación de los contaminantes. La NT tiene una gama de aplicaciones a futuro desde la producción hasta el manejo de poscosecha (Lira-Saldivar y Méndez-Argüello, 2016; Carrillo *et al.*, 2014).

Por otra parte, recientemente uno de los materiales usados como sustrato para los cultivos hidropónicos o como mejorador de suelo es la zeolita; este es un mineral natural de origen volcánico. Para formar el mineral, es a partir de deposición de ceniza volcánica en los lagos de aguas de contenido alcalino (Calleja, 2009). En 1972 se descubrió en México el primer depósito de zeolitas sedimentarias (clinoptilolita y mordenita) en el valle del río Atoyac, a 15 km al noroeste de la ciudad de Oaxaca y a 3 km al norte del poblado de Etlá. Años después se encontraron

depósitos de clinoptilolita en los estados de: Chihuahua, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala y Veracruz, en los que actualmente se explota y comercializa este mineral (Vásquez *et al.*, 2014). La zeolita natural producida de todo el mundo, parte de 1/3 se aplica como una piedra para construcción de edificios (Petranovskii *et al.*, 2015).

En nuestro país, la zeolita se empezó a usar como mejorador de suelo a partir de 1995 en el Campo Experimental Cotaxtla-INIFAP, en Veracruz, aunque Estados Unidos, Japón, Cuba y otros países de Europa realizan esta práctica desde hace varias décadas, con resultados sobresalientes en diversos cultivos (Vásquez *et al.*, 2014). También menciona González *et al.* (2012) que en 1996 y 1997 se establecieron numerosos experimentos en diversas regiones del estado de Oaxaca en los cultivos de temporal y de riego para determinar la mejor proporción de zeolita y adicionados con fertilizantes y abonos de estiércol.

Los fertilizantes nitrogenados como la urea al utilizar de forma extravagante en la agricultura han provocado grandes cambios del suelo sobre sus características físicas, químicas y biológicas por su uso inadecuado. Para revertir estos daños con recursos renovables se ha hecho poca investigación. Al utilizar zeolita en suelos con poca fertilidad puede mejorar y/o aumentar la productividad agrícola, ya que este sustrato tiene características físicas y químicas muy favorable, así por mencionar los microporos, estos pueden fijar las partículas de los nutrientes y serán liberados lentamente y de esta manera se podrá evitar las pérdidas de los nutrientes (Vásquez *et al.*, 2014 y Villareal *et al.*, 2015)

Uno de los grandes efectos de la zeolita, ha manifestado favorablemente en la agricultura temporal, donde evita las pérdidas de nitrógeno el 70%, con ello da un resultado con mayor rendimiento de los cultivos. En diferentes países ha dado buenos resultados al combinar el 25% de zeolita con una características física de granulometría de 3 milímetros de diámetro con fertilizantes nitrogenados (Vásquez *et al.*, 2014).

II. OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto combinado de nanopartículas de óxido de hierro y sustrato zeolítico en variables fisiológicas del cultivo de tomate, bajo condiciones de agricultura protegida en invernadero y malla sombra.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar el efecto de las nanopartículas de óxido de hierro en el crecimiento, desarrollo, producción de biomasa fresca y seca del cultivo de tomate
- Analizar el efecto de la mezcla de sustrato de zeolita con perlita en diferentes proporciones para evaluar crecimiento, desarrollo y rendimiento de esta solanácea.

III. HIPÓTESIS

- Las nanopartículas y la zeolita afectarán positivamente algunas respuestas fisiológicas, así como el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas de tomate.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Origen e importancia del cultivo de tomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es originario de América del Sur, de la región andina, particularmente de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile. Pero su domesticación fue llevada a cabo en México (central de América). El nombre de jitomate procede del náhuatl *xictli*, *ombli*go y *tomatl*, tomate, que significa tomate de ombligo (SAGARPA, 2010 y Brouwer *et al.*, 2011).

El cultivo de tomate es uno de los productos agrícolas con mayor valor económico a nivel mundial y principalmente se ha inclinado a producir en sistema hidropónico en los últimos años. En nuestro país existen distintas variedades de tomate que son importantes para el mercado, están el tomate cherry, saladette, tipo pera, bola y bola grande (SAGARPA, 2016)

Durante los últimos años ha aumentado la producción, porque se ha dado mayor interés, implementando nuevas tecnologías que proponen mayor producción del cultivo, por tal razón en los últimos 10 años se ha reducido casi 20 mil hectáreas de superficie, pero se ha incrementado la producción a 500 mil ton ha⁻¹ (SAGARPA, 2016). Con las estadísticas por parte de (SIAP, 2016) menciona que México están destinadas a la producción de tomate por más de 51 mil hectáreas y con una producción calculada de 2.8 millones de toneladas. Los principales productores de tomate son estados de Sinaloa, Michoacán, Zacatecas, San Luis Potosí, Baja California Sur y Jalisco. México está ubicado uno de los principales países exportadores de tomate y tiene participación del 21% en el mercado internacional siendo Estados Unidos, Canadá y algunos países de Europa los principales consumidores; con lo cual las exportaciones ascienden a poco más de 20 mil millones de pesos (SAGARPA, 2016).

4.2 Agricultura protegida

Según Juárez *et al.* (2011) y Aguilar *et al.* (2011) la agricultura protegida es un método de producción que se realiza bajo diversas estructuras, para evitar los daños que causan los efectos de los fenómenos climáticos del medio natural. Con la agricultura protegida ofrece el crecimiento y desarrollo óptimo de los cultivos, y de alto rendimiento. Además por este sistema de producción, se obtiene productos de alta calidad, con alto índice de inocuidad y mejores precios para el mercado.

La agricultura protegida genera 8 empleos directos por hectárea, se obtiene incremento hasta 5 veces de producción con relación al campo abierto, donde se produce con 70 ton ha⁻¹ en campo abierto y en cambio en la agricultura protegida se obtiene con 350 ton ha⁻¹ de rendimiento. Se puede tener producción todo el año, con ello se aprovecha las demandas del mercado con altos precios de venta. Con una perspectiva favorable para el medio ambiente con este sistema, ya que hay ahorro de agua con un promedio de 50% (SAGARPA, 2012).

Con base a los datos estadísticos por SAGARPA (2012) en México existen alrededor de 20 mil hectáreas bajo agricultura protegida de los cuales representa 12 mil hectáreas de invernadero y 8 mil de malla sombra y macro túnel. En el país, el 50% con superficie de la agricultura protegida se encuentran principalmente en los estados de; Sinaloa (22%), Baja California (14%), Baja California Sur (12%) y Jalisco (10%) y los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son el jitomate (70%), pimiento (16%), pepino (10%). En los últimos años se ha intensificado la diversificación de cultivos como la papaya, fresa, chile habanero, flores, plantas aromáticas. Con base la información en los últimos ha tenido gran auge con el sistema de producción bajo cubierta debido por los grandes beneficios que proporciona para el agro mexicano.

4.3 Sustratos

4.3.1 Características y propiedades de sustratos

Como definición de sustrato podemos encontrar como un lecho que sirve de sostén y soporte para el desarrollo del sistema radicular de plantas. Este elemento reviste una gran importancia en el éxito del cultivo, antes de pensar en nombre o tipos de sustratos se debe tener presente la conjugación de una serie de factores o propiedades para optimizar la funcionalidad y el papel que debe desempeñar un sustrato en el sistema de cultivos sin suelo (Mora, 1999).

Los cultivos hidropónicos utilizan los sustratos como soporte de las plantas, pero no existe un sustrato ideal en todos los sistemas; cada uno representa una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar, las variables ambientales y de la instalación. El sustrato es un medio inerte que ancla las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles una buena aireación, además de contener agua y los nutrientes que las plantas necesitan (Arcos *et al.*, 2011).

Las características de un sustrato son el resultado de sus propiedades físicas. Estas dependen de la estructura de los componentes y vienen definidas por la proporción entre partículas de tamaño grande y pequeño, el conjunto de poros y los volúmenes relativos de agua y de aire que ocupan los poros. Un sustrato apto para el cultivo debe cumplir las siguientes condiciones: acumular y suministrar grandes cantidades de agua; una estructura estable en un largo periodo de tiempo para mantener el suficiente volumen de aire para la aireación del sistema radicular, incluso en un exceso de riego; absorber y retener nutrientes en forma asimilable a las plantas, además de una buena capacidad amortiguadora para compensar el exceso o déficit de nutrientes; y ser química y biológicamente inerte de preferencia (FAO, 2015).

En la actualidad los sustratos representan un componente importante en la agricultura moderna, específicamente en los sistemas semi-hidropónicos de especies hortícolas. Existe una gran variedad de materiales que pueden utilizarse como sustratos agrícolas, pero existen criterios que deben de considerarse para su elección (Cruz-Crespo *et al.*, 2013).

4.4 Sustrato de *peat moss* o turba

Es un musgo de pantano perteneciente al género *sphagnum*, una de las características que presenta, es que tiene gran capacidad de retención de agua, por tal motivo es muy utilizado en la agricultura principalmente en área hortícola. Su densidad de aparente consta de 50 a 200 kg/m³ en materia seca, pero su densidad real es de 1.5 g/cm³. Este tipo de sustrato se considera muy bajo con presencias de microorganismos (Burés, 1997) y ligera en peso (Resh, 2006). Es muy utilizado para germinación de semillas (Samperio, 2004).

4.5 Sustrato de perlita

Es un mineral proveniente de material volcánico, para obtener su tamaño conocido es sometido a temperaturas altas de 1000° c y, da lugar una partícula blanca y muy ligera en su peso, además tiene una característica física muy particular; que tiene mayor porosidad y buen drenaje (Landis *et al.*, 1990). Su densidad es de un promedio de 0.12 gr cm³ ⁻¹ de materia seca, su pH es neutro de 6.5 a 7.2, en característica biológicamente y químicamente es un material inerte debido por su proceso de obtención (Burés, 1997) y la capacidad de absorber es de tres a cuatro veces su peso en agua. Es muy utilizado para incrementar la aireación de las mezclas de sustrato, debido por su tamaño (Resh, 2006).

4.6 Sustrato zeolítico

4.6.1 Historia y su uso potencial

Las zeolitas fueron reconocidas como un grupo mineral por el suizo Axel Fredrik Cronsted en 1756. Que al calentar el mineral, tuvo una reacción de propulsar humo y salpicaban como el agua evaporada y se vio notar que las piedras estaban hirviendo. Por su reacción se denominó piedras que hierve, utilizando las palabras griegas; *Zeo*: hervir y *lithos*: piedras, con el conjunto de las dos palabras hoy se conoce como mineral zeolita (Esquivel, 2011). Al conocer que el mineral tiene intercambio de iones fue reportada por primera vez por Damour en 1840, quien demostró que estos minerales podrían ser reversiblemente deshidratados sin presentar cambios en sus características físicas (Jakkula, 2005).

Las zeolitas naturales son cristales minerales de aluminosilicatos hidratados de los metales con cationes alcalinos o alcalinotérreos (Virta, 2002), presenta microporos con estructura bien definida, contiene silicio, aluminio, oxígeno y algunos cationes en la (Figura 1) muestra su estructura interna del mineral. La zeolita tiene una amplia variedad de usos, así como, en la agricultura, acuicultura y pecuaria debido sus características físicas y químicas (Medina, 2013).

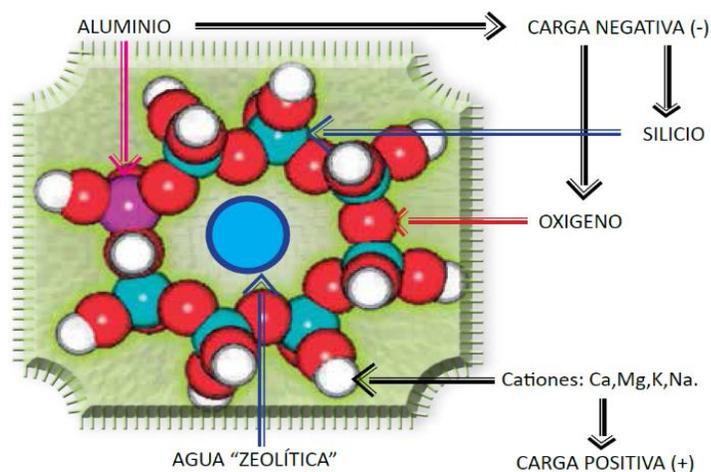


Figura 1. Estructura interna de zeolita. (Tomado de: Paredes *et al*, 2013).

Las especies minerales de la familia de zeolitas pertenecen los aluminosilicatos hidratados de Na, K y Ca (\pm Ba, \pm Sr y \pm Mg) con casi 40 especies

minerales. Todas las especies minerales de esta familia tienen la estructura tridimensional de armazón con cavidades voluminosas y comunicantes en las cuales se disponen grandes cationes, principalmente de Ca, Na, K, Sr, Ba y las moléculas de agua. Su fórmula general es $(Na_2K_2,Ca) [(Al,Si)O_2]_n \times H_2O$, se muestran algunas especies y sus características químicas y físicas (Cuadro 1) (Ostrooumov, 2006).

Cuadro 1. Características físicas y químicas de algunas especies de zeolita

Especie mineral	Formula química	Sistema cristalina	Densidad g/cm ³	Relación Si/Al	Porosidad (%)	Canales principales A
Clinoptilolita	$Na_2(Al_2Si_7O_{18})$	Monoclínico	2.16	5	39	10
Mordenita	$Na(AlSi_5O_6)_3H_2O$	Ortorrómbico	2.13	5	28	6-7
Chabasita	$Na(AlSi_2O_6)_3H_2O$	Trigonal	2.1	2	47	3.6-3.7
Filipsita	$KCa(Al_3Si_5O_{16})_6H_2O$	Monoclínico	2.15	3	31	4.2-4.4
Erionita	$KCa(Al_3Si_9O_{24})_9H_2O$	Hexagonal	2.0	3	35	3.6-5.2

El uso que se ha dado al material mineral zeolita es la eliminación de metales pesados y otros cationes en agua potable o contaminada o en aguas residuales, juegan un papel importante en la agricultura, ya que se utilizan para mejorar tierras cultivables, potenciar los componentes químicos y abonos orgánicos así como los sustratos zeopónicos para el desarrollo de las plantaciones. También se utilizan en la industria de ganado, comúnmente como aditivo alimenticio (Petranovskii *et al.*, 2015).

En la agricultura moderna se ha utilizado los fertilizantes para obtener mayores rendimientos a los cultivos, pero por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados ocasiona contaminación del suelo y agua, principalmente el nitrógeno se pueden lixiviar y volatilizar rápidamente al estar en el suelo (Medina *et al.*, 2001). Por tal motivo se ha dado un enfoque sobre remediaciones de suelo y buscando alternativas eficientes. En caso del mineral zeolita por su capacidad de retención de agua contribuye a minimizar la concentración de nitratos presentes en la lixiviación

del suelo, con ello, se logra bajos niveles de contaminación edáfica y acuífero (Toro *et al.*, 2006).

El trabajo de Urbina *et al.* (2011) sobre el empleo de zeolita comparando con tezontle en cultivo de Gerbera (*jamesonii*) en sistema hidroponía, menciona que no hubo diferencias significativas, pero se utilizó mayor concentración de solución nutritiva con el sustrato de tezontle, en cambio el sustrato zeolítico manejaron menor concentración de solución nutritiva dando resultado favorable, que retuvo mayor cantidad de cationes y demostrando buen crecimiento del cultivo.

Durante los ciclos primavera-verano 2009 y otoño-invierno 2010, un grupo de investigadores del INIFAP condujo 100 parcelas de validación en 15 estados de la República Mexicana con el objetivo de evaluar el efecto de la zeolita aplicada en mezcla con fertilizante y micorriza INIFAP en la productividad de los cultivos de maíz, cebada, trigo, sorgo, frijol y soya bajo condiciones de temporal y riego. Al sustituir el 25% del fertilizante nitrogenado por zeolita más micorriza los rendimientos fueron similares a los obtenidos en el tratamiento con el 100% de la fertilización más micorriza, y significativamente superiores a los del testigo. El efecto aislado al sustituir el 25% del fertilizante mostró una reducción ligera en el rendimiento en todos los cultivos; sin embargo, el costo de producción se redujo en 5% (Paredes *et al.*, 2013).

La aplicación de zeolita sódica (45% clinoptilolita y 55% mordenita) empleada en este estudio, tuvo un efecto positivo sobre la producción de la biomasa aérea, de raíces y total de la avena, sin que hubiese diferencias estadísticas en el rendimiento a partir de la adición de 10% de zeolita. El ambiente químico del medio de cultivo (mezcla de zeolita con el suelo) fue modificado con los tratamientos aplicados, variando el pH, CIC y la concentración de NH_4^+ . La cantidad de NO_3^- en la solución lixiviada disminuyó significativamente respecto a la concentración de NH_4^+ en el sustrato, lo que apoya que la zeolita tiene capacidad para adsorber amonio y aminorar el proceso de nitrificación (Flores *et al.*, 2007).

Una de las investigaciones efectuadas en Ecuador por Sánchez *et al.* (2012) sobre cultivo de cacao con la aplicación del 25 y 30% de zeolita se registraron mayor floración y fructificación, siendo el 25% de zeolita el tratamiento que presentó la mayor rentabilidad.

4.7 Nanotecnología

Los principios de la nanotecnología se remonta al 29 de diciembre de 1959, cuando el físico estadounidense Richard Feynman dio una conferencia ante la Sociedad Americana de Física APS por sus siglas en inglés donde presentó una visión tecnológica acerca de los beneficios que supondría para la sociedad el que fuéramos capaces de manipular las sustancias y fabricar artefactos con una precisión de unos pocos átomos. Sin embargo fue en 1974 cuando el especialista Japonés Nomo Taniguchi creó el término “nanotecnología” (Alamillo, 2013).

Los nanomateriales son una nueva clase de materiales (sean cerámicos, metales, semiconductores, polímeros, o bien una combinación de estos), en donde por lo menos una de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nanométrico (nm). Estos representan una transición entre moléculas y átomos, y un material con dimensiones de sólido volumétrico.

Los nanomateriales se clasifican en cuatro tipos:

- Materiales de dimensión cero: las tres dimensiones se ubican en el régimen nanométrico, a esta, corresponden las nanopartículas.
- Una dimensión, teniendo una longitud variable, conservan una sola dimensión en el régimen nanómetros, el caso de nanoalambres y nano tubos de carbón.
- Dos dimensiones, con áreas de tamaño indefinido, mantienen su espesor en el orden de 1 a 100 nm.

- Tres dimensiones, en que los sólidos tridimensionales están formados por unidades manométricas (Gutiérrez, 2006).

Las nanopartículas específicamente, han existido en el planeta por siglos. Algunos ejemplos son las partículas de humo y las nanopartículas dentro de bacterias. Más adelante, en algunas civilizaciones antiguas ya se estaban aprovechando sus propiedades ópticas y medicinales. La relación entre el número de átomos superficiales y el tamaño de la partícula es de carácter exponencial. Por ello, las propiedades relacionadas con la superficie, como las eléctricas, mecánicas, magnéticas, ópticas o químicas de los nanomateriales son diferentes a las de los mismos materiales a escala no nanométrica. Esas propiedades juegan un papel importante en la toxicidad de estas partículas ultra finas y es importante conocerlas para entender, predecir y gestionar el riesgo potencial (Alamillo, 2013).

La nanotecnología (NT) tiene una vasta área de la investigación interdisciplinaria, debido que con ella se abre un amplio abanico de oportunidades en diversos sectores como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sustentable (Prasad *et al.*, 2014). Hoy los científicos agrícolas se enfrentan a una amplia gama de desafíos como el estancamiento en el rendimientos de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de nutrientes, la disminución de la materia orgánica del suelo, las deficiencias de múltiples nutrientes, el cambio climático, la reducción de la superficie agrícola, la baja disponibilidad de agua para riego y la escasez de mano de obra; además del abandono de personas desde las áreas agrícolas a las ciudades (Dubey y Mailapalli, 2016). Para afrontar las grandes diversidades de problemas, es necesario explorar una de las tecnologías de vanguardia como la NT, misma que permite detectar la presencia de plagas y enfermedades, contaminación de alimentos y aplicar la cantidad correcta de nutrientes y pesticidas que promuevan la productividad, al mismo tiempo que garanticen la seguridad del medio ambiente y una mayor eficiencia en el uso de insumos agrícolas (Nuruzzaman *et al.*, 2016).

Se han desarrollado nuevos nanomateriales basados en el uso de NPs metálicas, poliméricas, inorgánicas, etc., que permiten aumentar la productividad y que buscan encontrar aplicaciones para el perfeccionamiento de nanosistemas inteligentes para la captura e inmovilización de nutrientes y su gradual liberación en el suelo (Kottegoda *et al.*, 2011). Esos métodos tienen la ventaja de reducir al mínimo la lixiviación, al tiempo que optimizan la absorción de nutrientes por las plantas y coadyuvan a mitigar la eutrofización al reducir la transferencia de nitrógeno a los mantos acuíferos subterráneos (Liu y Lal, 2015). Además, es importante mencionar que los nanomateriales también podrían ser explotados para mejorar la estructura y función de los plaguicidas mediante el aumento de la solubilidad, la resistencia contra la hidrólisis, mejorando su fotodescomposición y/o proporcionando una manera más eficaz de liberación controlada hacia los organismos objetivo (Mishra y Singh, 2015).

En las investigaciones recientes de la NT en relación de la bioencapsulación de agroquímicos y microorganismos benéficos ha adquirido una gran preeminencia porque es una manera de controlar plagas y enfermedades con bajo impacto ambiental, lo cual permite reducir la cantidad de agroquímicos que dañen los ecosistemas (Grillo *et al.*, 2016). Es por eso que las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento, debido a que sus beneficios potenciales se enfocan a mejorar la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas al ser utilizados en menor volumen y promoviendo mejoras en la nutrición, con un enfoque moderno en las nuevas fronteras de la agricultura no tradicional (Razzaq *et al.*, 2016).

Todas esas aplicaciones potenciales que han sido generadas por trabajos de investigación que exponen los resultados generados no solo en aspectos relacionados con electrónica, mecánica, medicina, sino también en el sector biológico, y en especial lo relativo al efecto de los nanomateriales en diversos aspectos fisiológicos y bioquímicos de plantas cultivadas (Lira *et al.*, 2016). Las aplicaciones de la NT en la agricultura son muy diversas, destacando principalmente

la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada, para la producción de nano, macro y micronutrientes, así como para hacer más eficiente el uso y aplicaciones de los agroquímicos (Nuruzzaman *et al.*, 2016). En la (Figura 2) que presenta el uso potencial de la NT para diseñar y fabricar nanosensores que permiten detectar la presencia de plagas y enfermedades de cultivo (Fraceto *et al.*, 2016). Asimismo la NT ha permitido el desarrollo de empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacterial o fúngico al estar envasados. También muestra que diversos tipos de NPs metálicas como las de Ag, Fe, Cu, Zn, etc., pueden ser utilizadas con un enfoque dual, ya sea como nanofertilizantes al promover el crecimiento de las plantas (Jeyasubramanian *et al.*, 2016).

Cuando las NPs son aplicadas al follaje se absorben a través de los estomas y su translocación o transporte basipétalo hacia la base del tallo es por el floema (Figura 3). Al ser aplicadas al suelo o en el agua de riego penetran a través de la epidermis de la raíz y la corteza, posteriormente pasan a la endodermis y finalmente entran al tejido conductivo del xilema para ser traslocados a larga distancia hasta las ramas y el follaje de las plantas (Peng *et al.*, 2015). Se ha señalado que las paredes y membranas celulares actúan como una eficaz barrera a la entrada de cualquier tipo de NPs, y que la efectividad de su entrada y transporte está determinado por el tamaño de los poros de la pared celular, que están en el rango de 5 a 20 nm (Fleischer *et al.*, 1999; Eichert *et al.*, 2008). Por lo tanto, sólo NPs de un tamaño menor al de los poros de la pared celular pueden pasar con facilidad y penetrar al citoplasma celular.

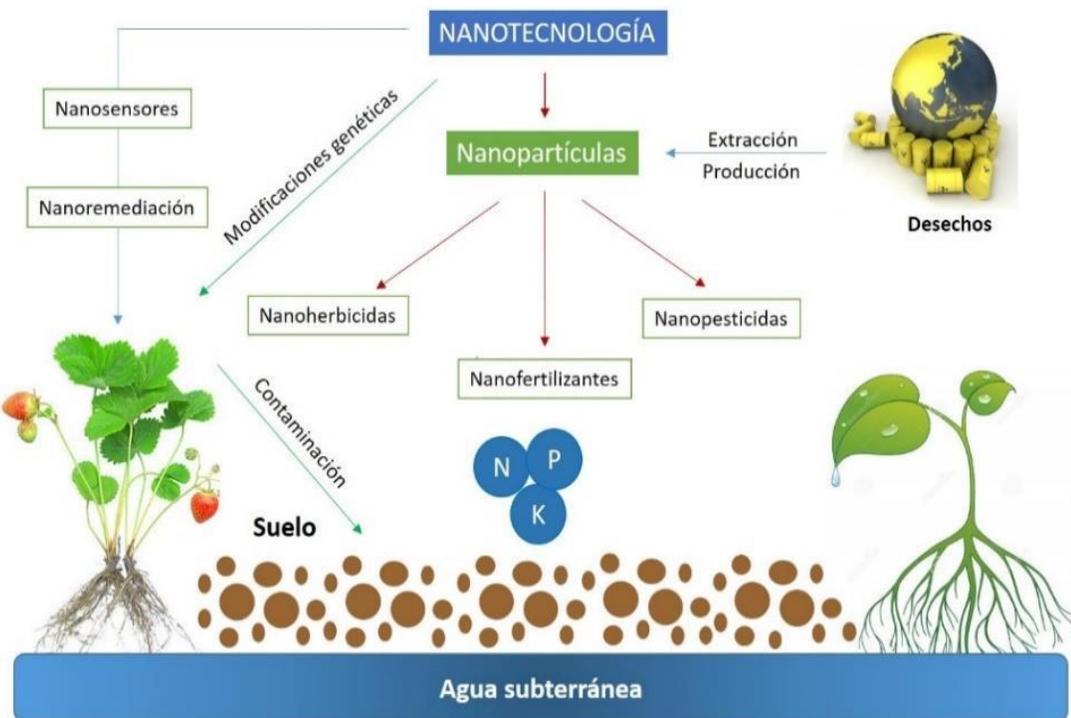


Figura 2. Aplicaciones potenciales de la NT y de las nanopartículas en la agricultura (Lira *et al.*, 2016).

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

Mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las NPs en las plantas está no únicamente relacionado con su concentración, tamaño y las propiedades inherentes del elemento involucrado, sino también con la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta, esto es, si actúa como micronutriente como es el caso del cobre, zinc y hierro (Wang *et al.*, 2015).

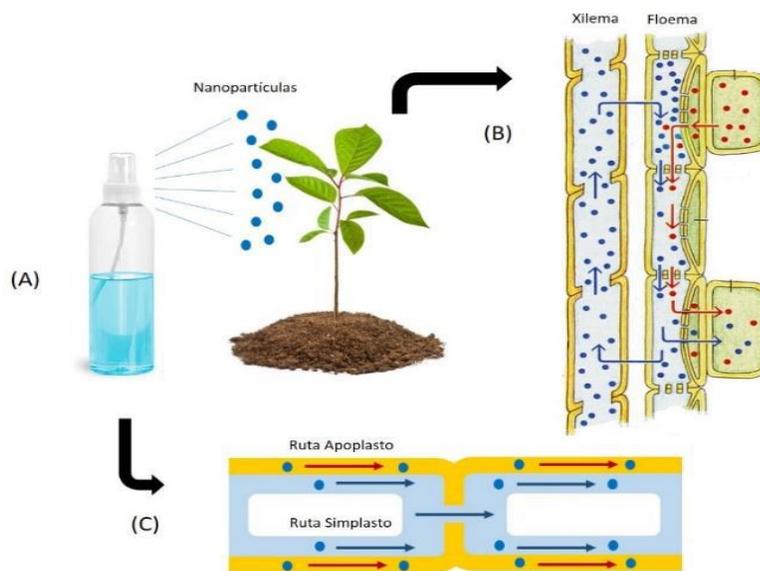


Figura 3. (A). Esquema que ilustra la aplicación de nanopartículas al follaje de las plantas. (B) Cuando son absorbidas a través de los estomas se translocan o transportan vía floema. (C) Cuando se aplican a la zona radicular su translocación a larga distancia es principalmente por el apoplasto del tejido conductor del xilema (Lira *et al.*, 2016).

La nutrición mineral de las plantas es de gran relevancia, 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). Los nanodispositivos se consideran que tendrán la capacidad de detectar una infección, la deficiencia de nutrientes en las plantas, o cualquier otro problema de fitosanidad, mucho antes de que los síntomas sean evidentes en la escala macro (Scott y Chen, 2013). Este tipo de tratamiento puede ser dirigido a la zona afectada con una mayor conciencia sobre los riesgos asociados con el uso de plaguicidas sintéticos o tradicionales (Lira *et al.*, 2016).

Un estudio realizado por Shailesh *et al.* (2013) sobre el efecto de nanopartículas con 20 ppm-ZnO, 50 ppm-nano-FeO, 50 ppm nano-óxido-ZnCuFe y el control con solución de Hoagland. En donde fue por el método suspensión de partículas como micronutriente en el crecimiento del cultivo de frijol mungo (*Vigna*

radiata), al igual por método de pulverización foliar. Obtuvieron resultados prometedores en diferentes variables del cultivo al aplicar nanopartículas comparando con el testigo. Demostró el efecto en longitud del tallo, número de raíces y longitud de raíz con mayor aumento de tamaño con relación al control.

En particular, la planta tratada con el nanopartículas de óxido- ZnFeCu mostró aumento de 15.71% en la longitud de brotes, mientras que en las plantas tratadas con nanopartículas de FeO mostraron aumento 10.25%, y nanopartículas de ZnO mostró un aumento de 6.47% con respecto al control. En biomasa húmedo, Nano-ZnO (20 ppm) plantas rociadas mostró un aumento del 31.79% en la biomasa de raíces y un incremento del 3.36% en la biomasa aérea; nano-FeO (50 ppm) plantas pulverizadas mostró un 30.15% aumento de la biomasa de las raíces y un 50.44% aumento de la biomasa aérea; y nano-ZnFeCu (50 ppm) pulverizado mostraron una aumento de 58.79% en la biomasa de las raíces y un 85.76% aumento de la biomasa aérea con relación sobre el control Shailesh *et al.* (2013).

En respuesta de biomasa seca, con aplicación de Nano-ZnO (20 ppm) plantas rociadas mostró un aumento del 39.59% en la biomasa de raíces y un incremento del 44.09% en la biomasa aérea; nano-FeO (50 ppm) plantas pulverizadas mostró un 68.16% aumento de la biomasa de las raíces y un 47.61% aumento de la biomasa aérea; y nano-ZnFeCu- plantas de óxido (50 ppm) pulverizado mostraron una aumento de 42.45% en la biomasa de las raíces y un 83.92% aumento de la biomasa aérea con respecto del control. Estos hallazgos muestran que el uso de suspensiones de nanopartículas y por pulverización foliar para la entrega dirigida de sustancias en las células vegetales es una aplicación factible (Shailesh *et al.*, 2013).

V. METODOLOGÍA

5.1 Ubicación del sitio experimental

El trabajo se realizó en un invernadero de tecnología media y en casa sombra, en el campo experimental del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila.

5.2 Bioensayo I

Evaluación de nanopartículas de óxido de hierro en diferentes concentraciones con dos métodos de aplicación vía foliar y a la base del tallo en cultivo de tomate.

5.2.1 Distribución de los tratamientos

Cuadro 2. Distribución de tratamientos que se evaluaron para promoción del crecimiento en plantas de *Solanum lycopersicum* por efecto de nanopartículas de hierro con 8 repeticiones por tratamiento.

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
	Micropartículas Fe (ppm)		Nanopartículas Fe (ppm)			
Control	25	50	25	50	25	50
	Aplicación base del tallo	Aplicación base del tallo	Aplicación foliar	Aplicación foliar	Aplicación base del tallo	Aplicación base del tallo
Fertilización Steiner incompleta (sin quelato de hierro)	Fertilización Incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta

T: Tratamiento, numeración que corresponde el orden de los tratamientos, sustrato que se utilizó *peat mos* y perlita de proporción 70/30 en volumen.

Cuadro 3. Solución nutritiva de Steiner para cultivo de tomate, usando los siguientes fertilizantes comerciales para la nutrición de la planta, donde se suprimió el quelato de hierro para fines efecto de nanopartículas de óxido de hierro.

Fertilizantes (macronutrientes)			
Nombre	Formula	Presentación	Cantidad
Nitrato de potasio	KNO ₃	solido	0.23 g/l
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂ .H ₂ O	solido	0.41 g/l
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	solido	0.2 g/l
Fosfato monopotásico (MKP)	KH ₂ PO ₄	solido	0.225 g/l
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	liquido	0.1 ml/l
Ácido nítrico	HNO ₃	liquido	0.59 ml/l
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	liquido	0.24 ml/l
Fertilizantes (micronutrientes)			
Nombre	Formula	Presentación	Cantidad
Sulfato de manganeso	MnSO ₄ .H ₂ O	solido	1.9 g/m ³
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	solido	2.52 g/m ³
Sulfato de cobre	CuSO ₄ .5H ₂ O	solido	0.08 g/m ³
Molibdato de amonio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	solido	0.09 g/m ³
Sulfato de zinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	solido	0.48 g/m ³

5.2.2 Establecimiento del experimento

Las plantas de tomate se trasplantaron en macetas de polietileno con capacidad de 1 L, en donde se ocupó sustrato de *peat moss* y perlita con una proporción (60:40 v:v), se estableció el sistema de riego por goteo con un cabezal que cuenta con tanque de almacenamiento con capacidad de 1100 L para la solución nutritiva, en donde se adaptó con una bomba de agua de ½ Hp sincronizado con un temporizador eléctrico digital, con ello se programó 9 riegos/minuto por día.

5.2.3 Aplicación de nanopartículas

Las aplicaciones de nanopartículas del óxido de hierro y los micronutrientes se aplicaron en dos etapas; el primero se aplicó cinco días después del trasplante que fue manual con un atomizador para la vía foliar de 1 ml de solución por planta y la otra a la base del tallo con una pipeta (1 ml), y la segunda fue a los 16 días después

del trasplante pero con un volumen de 2 ml de solución por planta tomando en cuenta los tratamientos que se indica en el Cuadro 1. El cultivo se evaluó por 31 días.

5.2.4 Evaluación de variables

Se evaluaron las variables altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, número de botones, número de flores, índice relativo de clorofila (Minolta SPAD 502); estas variables se evaluaron cada semana por cuatro semanas, el área foliar (LI-COR modelo LI-300, Lincoln, Nebraska, USA), peso fresco de hoja, peso fresco del tallo, longitud de la raíz, peso seco de la hoja, peso seco del tallo y peso seco de la raíz, estas mediciones se realizaron al término del experimento.

Análisis estadístico. Para la evaluación de los tratamientos se empleó un modelo lineal en un diseño experimental completamente al azar, las variables respuesta se valoraron mediante análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias con nivel de significancia global $\alpha = 0.05$ (Duncan).

5.3 Bioensayo II

Evaluación del efecto de combinación de dos sustratos de zeolita con perlita en diferentes proporciones en cultivo de tomate.

5.3.1 Distribución de los tratamientos

Cuadro 4. Distribución de los tratamientos con diferentes proporciones de mezcla de sustrato zeolita/perlita que se evaluaron para crecimiento y rendimiento del cultivo tomate (*Solanum lycopersicum*) con 6 repeticiones por tratamiento

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Perlita	Zeolita	Z:P	Z:P	Z:P	Z:P	Z:P
100	100	30:70	40:60	50:50	60:40	70:30

T: tratamiento, numeración que corresponde al orden de los tratamientos, Z: zeolita, P: perlita, *proporción indica (volumen/volumen) mezcla del sustrato.

5.3.2 Establecimiento del experimento

Se lavó la charola con capacidad de 200 cavidades, luego se agregó sustrato fina de *peat moss* húmedo, en donde posteriormente se sembraron una semilla por cada cavidad; por lo que se estuvo regando una vez por día durante 45 días.

Se llenaron las macetas con un volumen de 5 litros con los sustratos de diferentes proporciones de mezcla, tal como se muestra en el Cuadro 4, luego se establecieron las macetas con diseño completamente al azar dentro de la casa sombra agrícola en dos columna puesto sobre vigas metálicas para tener un buen manejo del drenaje de la solución nutritiva.

Se estableció el sistema de riego por goteo, que consiste principalmente; un contenedor para la solución nutritiva, motobomba de agua que se conectó con el contenedor de la solución nutritiva para que bombee la solución con una conducción principal de un tubo para su posterior distribución en cada maceta.

Los accesorios que se utilizaron para distribuir después del tubo principal fueron; distribuidor con cuatro salidas, tubing y spikes, su función es que la solución llegue por goteo para que se humedezca controladamente el sustrato.

También se instaló un temporizador digital eléctrico sincronizado con la motobomba, para ello nos sirvió para programación de riego. Una vez instalado el sistema se preparó la solución nutritiva con la solución Steiner universal, en un contenedor establecido con la capacidad de 600 litros.

La programación de riego se realizó dos días antes del trasplante para humedecer bien el sustrato a las macetas correspondientes.

Después de 15 días de trasplante se colgaron rafia para realizar el tutoreo de las plantas. El manejo de solución nutritiva siempre se tuvo un rango de pH de 5.5 a 7.0 y la conductividad eléctrica (CE) tuvo un rango de 2.0 a 2.5, en el manejo del drenaje se colocaron una bandeja debajo de la maceta, de cada tratamiento que tuvo seis repeticiones solamente se colocó una bandeja de una maceta para tomar la lectura de pH y CE, teniendo un dato de cada tratamiento.

5.3.3 Evaluación de las variables

Se evaluaron las variables de altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, índice relativo de clorofila (Minolta SPAD 502); se tomó la lectura de estas variables un intervalo de cada 15 días. La variable del drenaje en relación con volumen, pH y CE se tomaron la lectura dos veces por semana. La variable fotosíntesis y conductancia estomática (LI-COR 6400) se determinaron tres días antes de terminar el experimento, la lectura se tomaron cada hora durante todo el día, en donde se muestrearon 3 plantas por tratamiento.

Las variables del área foliar (LI-COR modelo LI-300, Lincoln, Nebraska, USA), peso fresco de hoja y peso fresco del tallo, por lo que, para determinar los datos de las variables mencionadas se procedió a la destrucción de la planta y se llevó al laboratorio.

Para la determinación del peso seco de raíz, hoja y tallo; se ingresó en el cuarto de secado con una temperatura de 70° c y después de 4 días se pesaron en laboratorio.

5.4 Análisis estadístico

Para la evaluación de los tratamientos se empleó un modelo lineal en un diseño experimental completamente al azar, las variables respuesta se valoraron mediante análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias con nivel de significancia global $\alpha = 0.05$ (Duncan).

VI. RESULTADOS

6.1 Bioensayo I. Efecto de la aplicación de NPs de óxido de hierro a plántulas del cultivo de tomate en condiciones bajo invernadero.

En base a los resultados obtenidos del experimento realizado se analizaron las variables morfofisiológicas del cultivo de tomate las cuales se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Variables fisiológicas en comparación entre las medias de cada tratamiento por el efecto de nanopartículas de óxido fierro

Tratamiento	Altura (cm)	Numero de hojas	índice relativo de clorofila (SPAD)	Diámetro del tallo (mm)
T1	59.06±(1.11)a	13.63±(0.86)a	42.86±(1.39)a	4.66±(0.12)a
T2	59.06±(1.59)a	13.5±(0.89)a	42.23±(1.19)a	4.59±(0.08)a
T3	59.56±(1.00)a	12.88±(0.69)a	44.95±(1.54)a	4.82±(0.17)a
T4	57.69±(1.53)a	14.63±(1.18)a	42.64±(1.69)a	4.72±(0.10)a
T5	57.13±(1.06)a	13.38±(0.92)a	44.91±(1.50)a	4.82±(0.17)a
T6	59±(1.09)a	15±(1.35)a	51.55±(6.73)a	4.64±(0.07)a
T7	61.63±1.67)a	13.75±(0.67)a	43.53±(1.48)a	4.57±(0.08)a
p-v	0.3267	0.7406	0.3012	0.6129

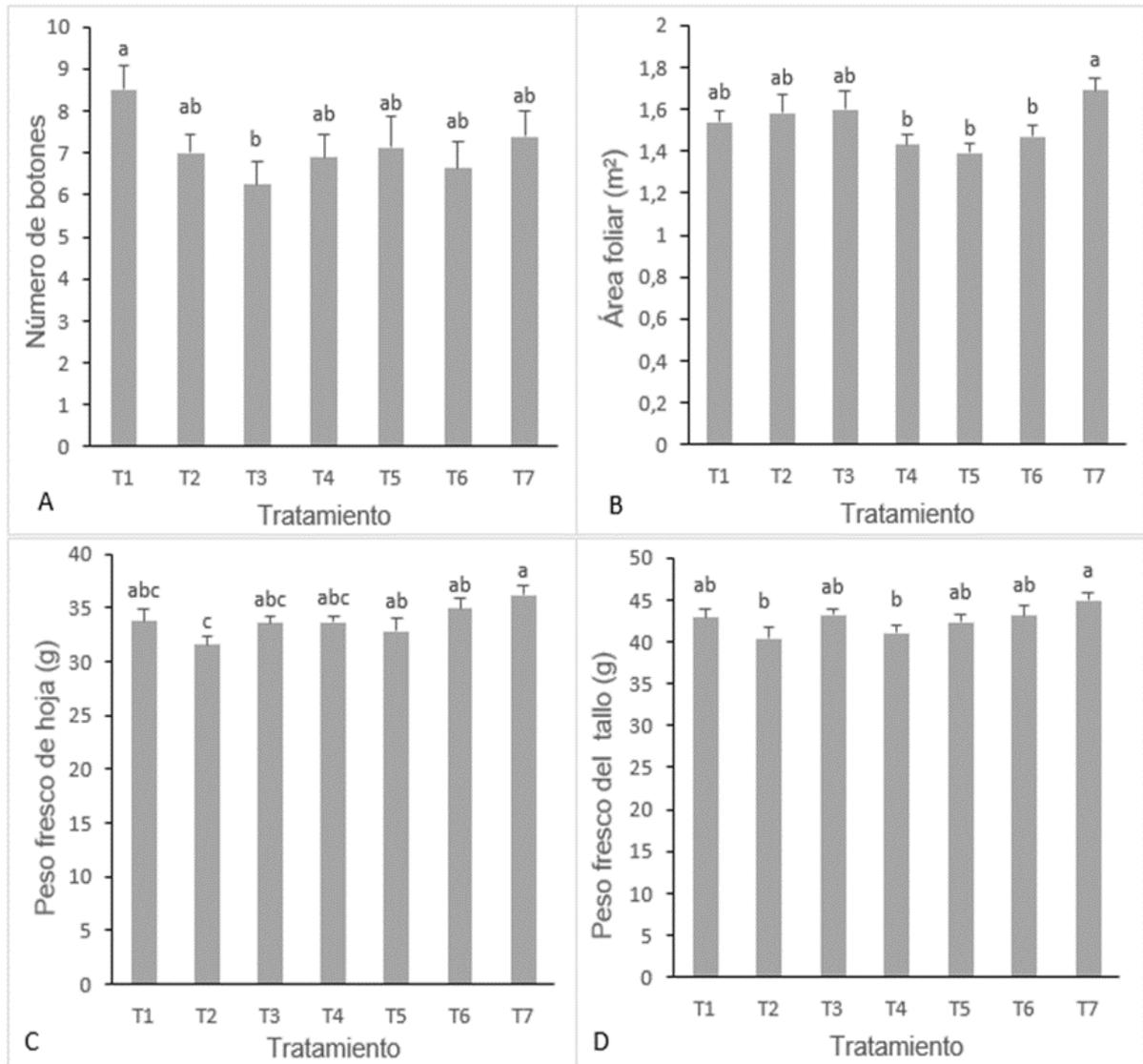
Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativas, con el programa InfoStat versión 2016.

En el Cuadro 5, muestra que la variable altura de la planta, no existe diferencias estadísticas significativas, pero analizando las tendencias se aprecia que el tratamiento 7 superó en 4% con respecto al tratamiento uno (testigo), en el número de hojas el tratamiento seis superó el 10% respecto al tratamiento uno en tendencia numérica, pero no existen diferencias significativas.

El índice relativo de clorofila muestra una gran diferencia del tratamiento 6 con respecto al tratamiento uno al 20%. En la variable diámetro del tallo no existe

diferencia significativa, pero con las medias en tendencia numérica el tratamiento cinco fue superior al 20% mayor con respecto al testigo.

Figura 4. Comparación de las medias de cada una de las variables fisiológicas del efecto de nanopartículas de óxido de hierro.



Metro cuadrado: m², gramos: g, análisis estadístico con prueba de Duncan. Literales con diferentes letras representan diferencia significativa (P<0.05). Las barras representan en error estándar de la media. Programa infoStat versión 2016.

En la Figura 4 A, con respecto al número de botones florales se presentan diferencias significativas, teniendo de mucha ventaja el tratamiento (testigo) uno, en

este caso no hubo efecto positivo de la aplicación de NPs óxido de hierro en diferentes concentraciones.

La variable área foliar (Figura 4B), existe diferencias significativas, en donde presentó el tratamiento siete con 10% mayor en comparación con el tratamiento uno. La variable del peso fresco de la hoja en la Figura 4C se obtuvieron diferencias significativas, en donde el tratamiento siete tuvo el 7% mayor con respecto al tratamiento uno. En la variable peso fresco del tallo existe un resultado favorable en relación a la aplicación de NPs de óxido de hierro presentando diferencias significativas, en donde el tratamiento siete superó el 5% con relación al tratamiento uno, ambas variables corresponden del cultivo de tomate.

Cuadro 6. Análisis estadísticos de variables comparación con las medias de los datos

Tratamiento	Longitud de raíz (cm)	Peso Seco de hoja (g)	Peso seco del tallo (g)	Peso seco de raíz (g)
T1	42.3±(1.20)a	4.52±(0.19)a	4.06±(0.20)ab	1.38±(0.11)a
T2	42.1±(2.97)a	4.35±(0.13)a	3.81±(0.27)b	1.25±(0.12)a
T3	43.7±(2.81)a	4.57±(0.16)a	4.09±(0.18)ab	1.22±(0.10)a
T4	38.2±(2.61)a	4.86±(0.13)a	4.23±(0.10)ab	1.54±(0.09)a
T5	42.9±(3.99)a	4.71±(0.22)a	4.38±(0.19)ab	1.39±(0.01)a
T6	43.7±(3.19)a	4.68±(0.34)a	4.46±(0.16)a	1.33±(0.06)a
T7	43±(4.02)a	4.83±(0.24)a	4.17±(0.20)ab	1.51±(0.16)a
p-v	0.8884	0.6284	0.3103	0.2585

Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, con el programa InfoStat versión 2016.

En el Cuadro 6, se presentan cuatro variables, en la variable de longitud de raíz se ve una diferencia del 2% del tratamiento seis en relación al tratamiento uno. En la variable del peso seco de la hoja el tratamiento siete tuvo 7% mayor con respecto al tratamiento uno. en el caso de la variable del peso seco del tallo se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos establecidos, dando de mayor relevancia a los tratamientos aplicados con NPs, en donde el tratamiento seis se obtuvo 10%, tratamiento 5 presentó 8%, tratamiento 4 con 4% y el tratamiento siete 3% mayor con respecto al testigo. En cambio, en la variable del peso seco de la

raíz no presenta diferencias significativas, pero relacionando en tendencia el tratamiento cuatro aventajó 12% con respecto al testigo.

La fotosíntesis del cultivo del tomate no hubo diferencias significativas donde se presenta en el Cuadro 7, pero en tendencia numérica el tratamiento 5 se obtuvo 16% mayor al testigo. En conductancia estomática no presenta diferencias significativas, en tendencia tuvo un efecto negativo en los tratamientos aplicados con Nps de óxido de hierro. Analizando la tendencia de la fotosíntesis en la Figura 5 podemos apreciar que todos tuvieron fluctuaciones muy heterogéneas de cada tratamiento tanto en el interior como en el exterior del invernadero durante el día.

Cuadro 7. Análisis estadísticos de fotosíntesis y conductancia estomática comparación con las medias de los datos

Tratamiento	Fotosíntesis (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Conductancia estomática (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
T1	6.18±(2.62)a	0.28±(0.10)a
T2	6.12±(1.38)a	0.29±(0.15)a
T3	6.1±(0.09)a	0.28±(0.18)a
T4	5.93±(0.98)a	0.25±(0.12)a
T5	7.19±(0.40)a	0.27±(0.16)a
T6	6.23±(0.50)a	0.27±(0.16)a
T7	5.64±(0.38)a	0.27±(0.18)a
P-V	0.9809	0.9999

Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, con el programa InfoStat versión 2016.

Figura 5. Tendencia de fotosíntesis del cultivo de tomate durante parte del día.

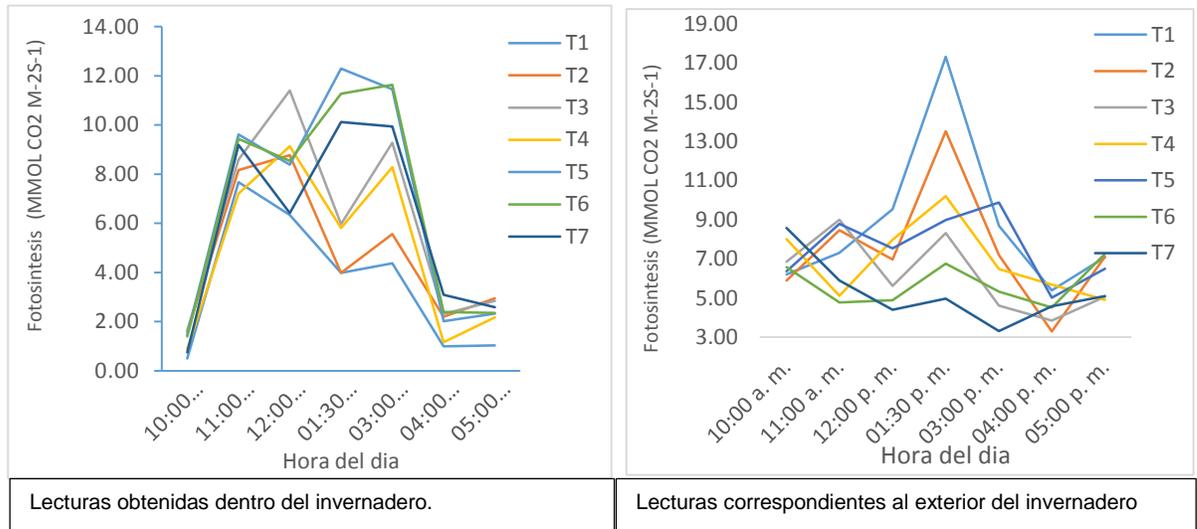
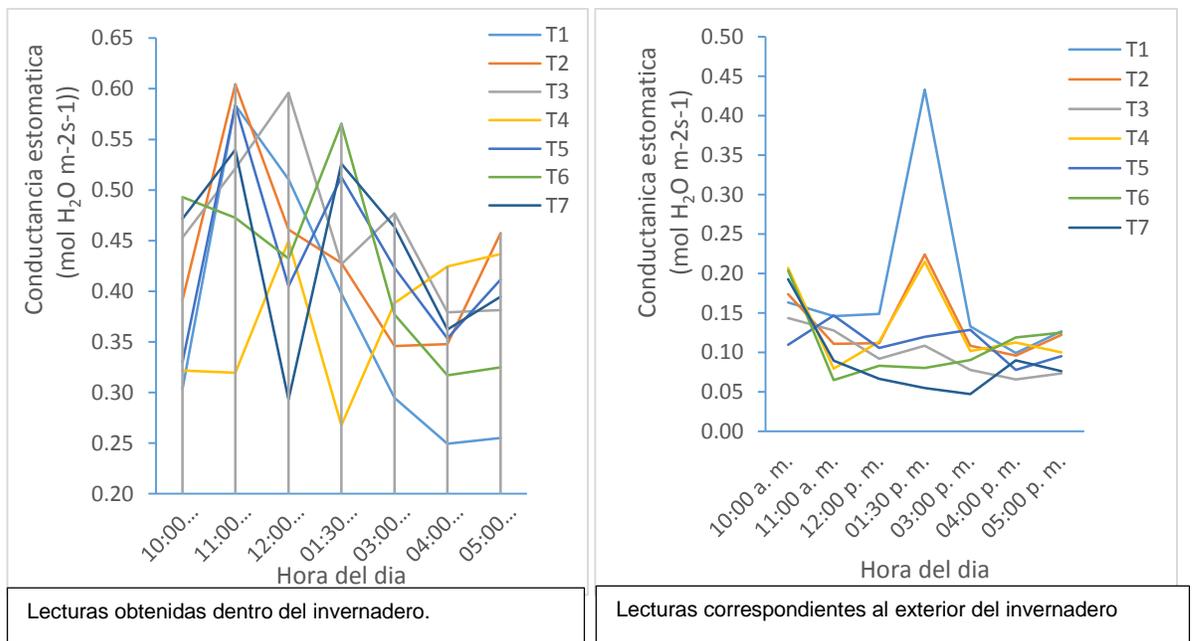


Figura 6. Tendencia de conductancia estomática del cultivo de tomate durante el día.



En la Figura 6 podemos apreciar la conductancia estomática que las tendencias no fueron con flujos uniformes durante el día, tanto en el interior como al exterior del invernadero, en donde el tratamiento uno y dos estuvieron con mayor fluctuación.

6.2 Bioensayo II. Efecto de mezcla de sustrato zeolítico con perlita en diferentes proporciones en cultivo de *Solanum lycopersicum*

En base la información obtenida durante del proceso del desarrollo experimental se realizaron el análisis de las variables morfofisiológicas del cultivo de tomate.

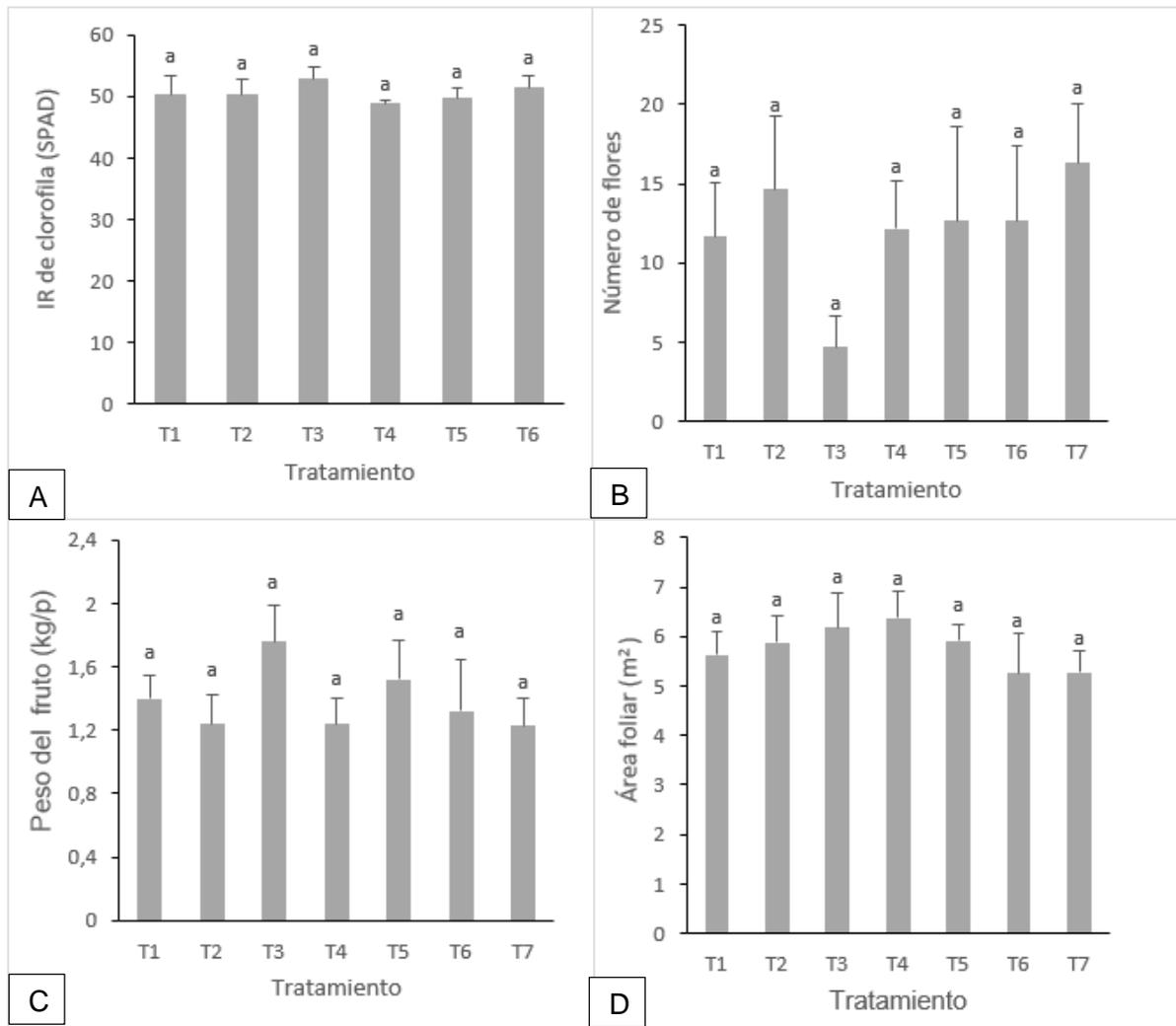
Cuadro 8. Variables analizadas con comparaciones medias estadísticas

Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Numero de hojas	Peso fresco del tallo (g)
T1	125.17±(12.33)a	15.8±(0.63)a	28.67±(2.68)a	618.05±(138.12)a
T2	130.5±(10.39)a	15.92±(0.61)a	25.67±(1.71)a	516.34±(35.57)a
T3	106.83±(8.12)a	16.23±(0.55)a	22.5±(2.47)a	448.83±(14.75)a
T4	131.67±(17.10)a	15.34±(0.81)a	26.5±(3.41)a	525.5 ±(71.05)a
T5	122.83±(8.66)a	15.76±(0.54)a	23.67±(1.84)a	467.76 ±(28.47)a
T6	119.67±(15.49)a	14.92±(0.99)a	23±(2.38)a	505.55 ±(64.28)a
T7	107±(5.09)a	16.16±(0.42)a	23.17±(1.47)a	429.04±(24.64)a
P-V	0.6091	0.826	0.4876	0.5327

Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, con el programa InfoStat versión 2016.

Con el análisis estadístico, podemos deducir que la altura de la planta no tuvieron diferencias significativas, pero si existe una tendencia positiva del efecto del sustrato zeolítico, en donde, el tratamiento cuatro tuvo 5.19%, el tratamiento dos 4.26% mayor con respecto al tratamiento uno (Cuadro 8). El diámetro del tallo no presenta un efecto en diferencia significativa, pero hay una tendencia positiva, en donde, el tratamiento tres presenta 2.72%, tratamiento siete 2.28%, tratamiento dos 0.76% mayor con relación al testigo. En caso de número hojas no presenta un efecto positivo, tanto diferencia significativa, así como, en tendencia numérica. En peso fresco del tallo no tuvo un efecto positivo el sustrato zeolítico en diferentes proporciones.

Figura 7. Efectos de mezcla de sustrato zeolítico con perlita comprando con medias estadísticas.



Índice relativo: IR kilogramo: Kg, planta: p, metro cuadrado: m², análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, con el programa InfoStat versión 2016.

En el índice relativo de clorofila hubo efecto positivo de la zeolita donde, en el tratamiento tres tuvo 5.07%, tratamiento seis con 2.24% mayor con relación al testigo. En caso de presencia de las flores durante la mitad del ciclo del experimento se determinó que en los tratamientos con sustrato de zeolita existe un mayor efecto,

en donde el tratamiento dos presenta 55.5%, tratamiento tres 43.3%, tratamiento cuatro 9.5%, tratamiento cinco 17.6%, tratamiento seis 52.7% y el tratamiento siete 12.2% mayor con respecto al testigo (Cuadro 10).

En la Figura 7(B), presenta el último dato obtenido del número de flores, en donde, el tratamiento siete tuvo 39.93%, el tratamiento dos 25.71%, el tratamiento seis y cinco 8.57%, el tratamiento cuatro con 4.28% mayor con lo que respecta al testigo. Como podemos apreciar que los tratamientos con sustrato de zeolita al inicio de floración presentó mayor cantidad y, al final del ciclo aún había presencias de flores pero demostró que hubo mayor precoz en el tratamiento tres porque se obtuvo debajo de la cantidad de flores comparando con el testigo.

Cuadro 9. Variables con análisis estadístico comparando las medias

Tratamiento	Peso fresco de hoja (g)	Peso seco de raíz (g)	Peso seco de hoja (g)	Peso seco del tallo (g)
T1	262.84±(21.29)a	21.69±(4.60)a	44.21 ±(3.54)a	148.13 ±(37.08)a
T2	261.31±(40.14)a	21.54±(2.12)a	47.24±(10.51)a	132.87 ±(30.34)a
T3	257.97±(33.26)a	20.74±(1.08)a	38.26 ±(4.03)a	93.18 ±(4.80)a
T4	292.81±(19.37)a	23.72±(5.12)a	53.17±(6.64)a	117.37 ±(25.39)a
T5	282.65±(24.62)a	28.6±(9.09)a	50.75 ±(3.48)a	121.33 ±(17.90)a
T6	251.24±(56.23)a	17.06±(3.48)a	40.76 ±(6.58)a	114.85 ±(27.87)a
T7	235.87±(15.41)a	23.45±(2.98)	41.17±(1.08)a	86.83 ±(8.44)a
p-v	0.9064	0.7621	0.5263	0.6073

Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, con el programa InfoStat versión 2016.

Con el uso de sustrato zeolítico en diferentes proporciones de mezcla si demostró un efecto positivo, en referencia al rendimiento de la producción del tomate, por lo cual, el tratamiento tres tuvo 25.71%, el tratamiento cinco con 8.57% mayor respecto al testigo que se utilizó en el sustrato de perlita (Figura 7C). En la determinación del área foliar demuestra un tendencia numéricamente positivo con el uso del sustrato zeolítico, en donde, el tratamiento cuatro se obtuvo 13.52%, el tratamiento tres 9.79%, el tratamiento cinco 5.16%, y el tratamiento tres 4.45% aventajando el testigo en la (Figura 7D).

Al determinar el peso fresco de la hoja y analizando las medias de los datos obtenidos, existe una tendencia positiva del efecto del uso de sustrato zeolítico de manera que el tratamiento tres presenta 11.40%, el tratamiento cinco 7.54% mayor en base al testigo. El peso seco de la raíz existe una tendencia favorable, donde presenta que el tratamiento seis tuvo 31.86%, el tratamiento cuatro 9.36% mayor del peso seco de la raíz con relación al testigo. Variable peso seco de la hoja, se deduce que el tratamiento cuatro con 20.27%, el tratamiento cinco 14.79% y el tratamiento dos 6.85% tuvieron una tendencia mayor en base al testigo, y el peso seco del tallo no hubo efecto positivo del sustrato zeolítico.

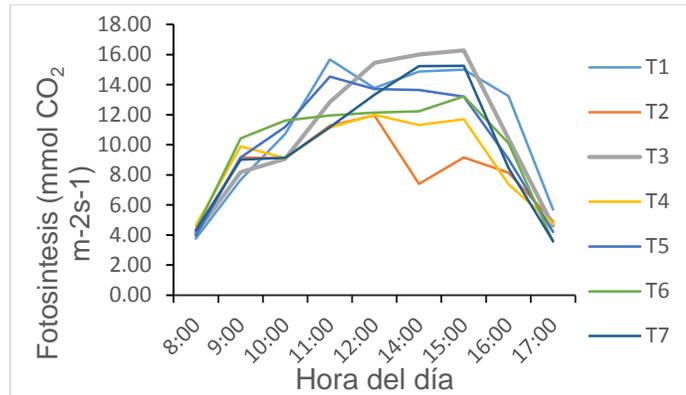
Cuadro 10. Variables con análisis estadístico comprando las medias

Tratamiento	Fotosíntesis (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Conductancia estomática (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	Número de flores *
T1	11.16 ±(0.32)a	0.28 ±(0.03)a	12.33±(2.09)a
T2	8.34 ±(0.23)b	0.16 ±(0.01)b	19.17±(2.82)a
T3	10.77 ±(0.51)a	0.23±(0.01)ab	17.67±(4.65)a
T4	9.1 ±(1.41)ab	0.21±(0.03)ab	13.5±(2.43)a
T5	10.29 ±(0.64)ab	0.25±(0.04)a	14.5±(4.04)a
T6	9.95 ±(0.47)ab	0.22±(0.01)ab	18.83±(3.03)a
T7	9.94 ±(0.47)ab	0.25±(0.02)a	13.83±(3.42)a
p-v	0.1332	0.0547	0.6445

Análisis estadístico con prueba de Duncan al 0.05 % de significancia, valores con la misma literal (letra) entre columna no hay diferencias significativos, p-v: probabilidad de valor, * variable analizada con dato de la mitad del ciclo del experimento, con el programa InfoStat versión 2016.

Con los datos analizados estadísticamente de la variable fotosíntesis de la planta, presenta diferencia significativa, en donde el testigo tuvo ventaja con respecto a los tratamientos con sustrato zeolítico, por ello, en este variable no demostró a favor el efecto zeolita. En conductancia estomática también presenta diferencia significativa, pero dando un efecto negativo el sustrato zeolita (Cuadro 10).

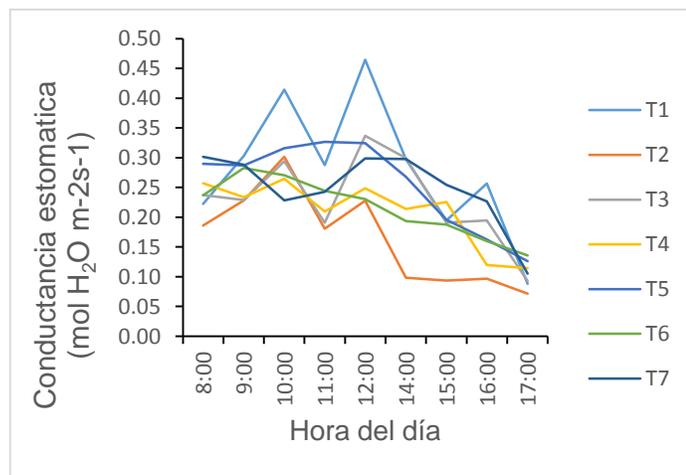
Figura 8. Fluctuaciones de fotosíntesis del cultivo de tomate durante el día en casa sombra



Se determinó con el medidor de fotosíntesis LI-COR6400.

Se puede apreciar en la Figura 8, donde se presentan las fluctuaciones de la fotosíntesis de cada tratamiento durante el día que fueron determinadas con un intervalo de cada hora, iniciando de las ocho horas de la mañana y terminando cinco horas de la tarde. Así como, también se presenta las fluctuaciones de la conductancia estomática (Figura 9) de cada tratamiento, por lo que se puede deducir que cada una de las fluctuaciones no tienen un flujo uniforme ya que demuestra la figura con mucha dispersión.

Figura 9. Fluctuaciones de conductancia estomática del cultivo de tomate durante el día en casa sombra



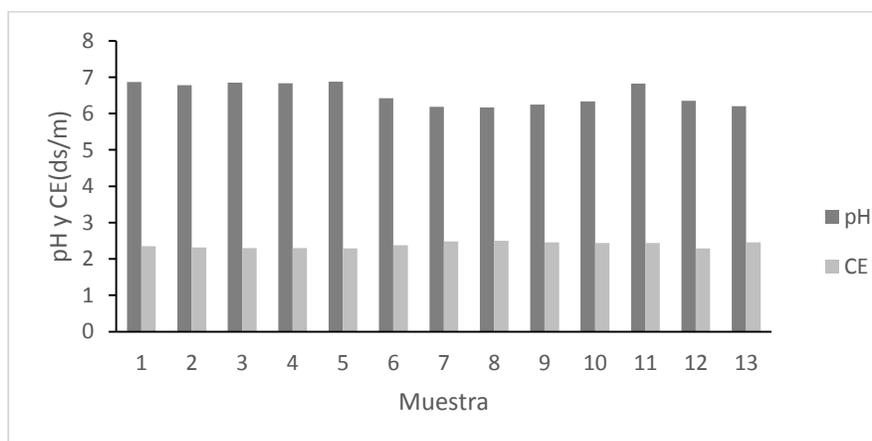
Se determinó con del medidor de fotosíntesis LI-COR6400.

Figura 10. A) planta de tomate con sustrato de perlita, B) planta de tomate con sustrato de zeolita.



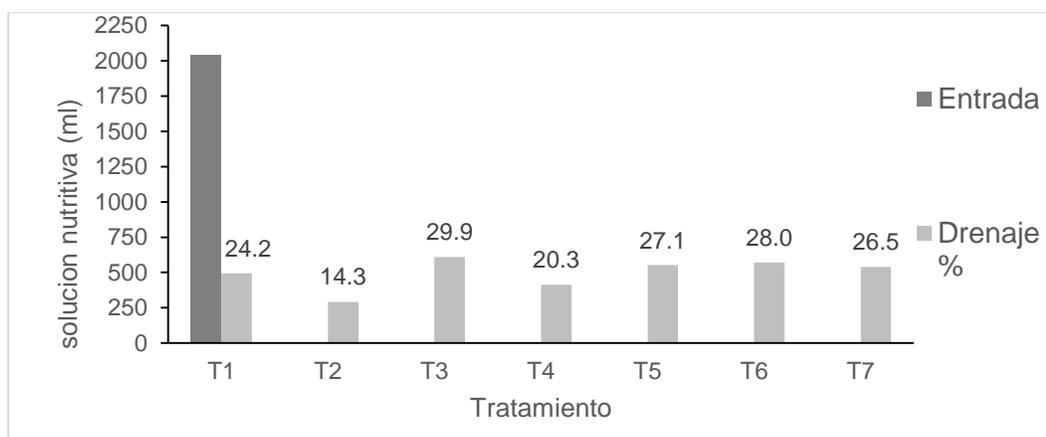
En el manejo de la solución nutritiva para el cultivo de tomate, los factores más importantes son el pH y conductividad eléctrica para tener el buen desarrollo de las plantas en el sistema de cultivo sin suelo, por ello, en la entrada de la solución se manejaron con un rango de 5.7 a 6.5 de pH y de conductividad con el rango de 2.0 a 2.50 dS/m, en donde, este factor al principio se manejó cerca de 2.0 y conforme fue creciendo la planta se le fue incrementado hasta tener un máximo de 2.50 dS/m (Figura 11).

Figura 11. Unidades de pH y Conductividad eléctrica (dS/m) de solución nutritiva de la entrada de en el cultivo de tomate.



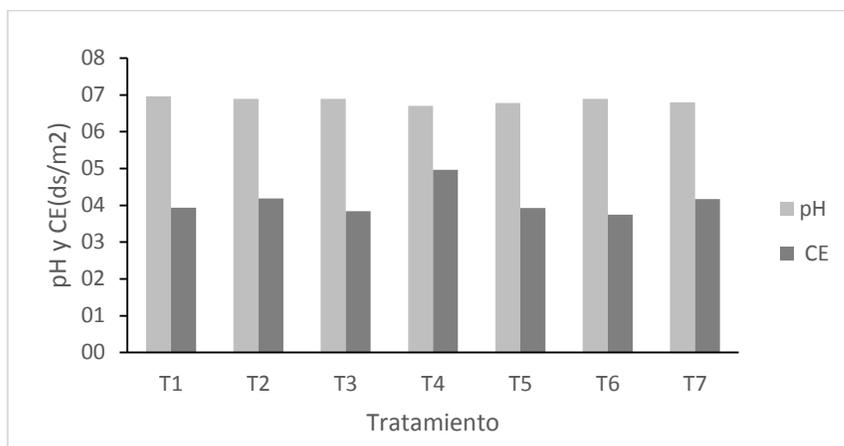
De acuerdo a los datos recabados, la cantidad de volumen que se inyectó de la solución nutritiva fue un promedio de 2040 ml por planta al día, ahora en cuestión del drenaje de cada tratamiento fueron muy variados, debido a las diferentes concentraciones de zeolita que se mezclaron, por lo cual, el testigo tuvo un 24.2%, tratamiento dos fue de 14.3%, el tratamiento tres de 29.9%, el tratamiento cuatro con 20.3%, tratamiento cinco de 27.1%, tratamiento seis con 28% y el tratamiento siete fue de 26.5% (Figura 12). El drenaje de cada tratamiento estuvo dentro del rango de la regla general que debe ser del 10 a 30% con respecto a la entrada del volumen, podemos apreciar que el tratamiento cuatro tuvo un drenaje intermedio dentro del rango, ya que los demás tratamientos fueron muy bajos y otros muy altos.

Figura 12. Volumen de entrada y drenaje de solución nutritiva en la maceta.



En base a la cantidad de drenaje en volumen que se obtiene de en cada maceta y/o tratamiento es muy influenciado por el pH y conductividad eléctrica y por ende, si el drenaje es de gran porcentaje estos factores dan un resultado muy similar con respecto a la entrada del pH y CE, pero en cambio, si el drenaje es muy poco, conforme va pasando el tiempo en los sustratos se van acumulando las sales por ello, dan un resultado de pH y conductividad alta con relación a la entrada. Podemos apreciar en la figura 13 que estos factores se ven reflejadas estrechamente con el porcentaje del drenaje en la figura 12.

Figura 13. pH y Conductividad eléctrica del drenaje en cada tratamiento en cultivo de tomate



VII. DISCUSIÓN

De acuerdo los resultados obtenidos sobre el efecto de NPs de óxido de fierro aplicados en dos vías (foliar y raíz) en el cultivo de *Solanum lycopersicum*, propiciaron mayor número de botones, área foliar, peso fresco de hoja, peso fresco y seco del tallo. Menciona Carrillo *et al.* (2014) que las nanomateriales pueden mejorar la eficiencia y la productividad, como promotores de crecimiento, que estudios realizados sobre los efectos de los nanomateriales en la germinación de las plantas y su crecimiento en plántulas de tomate aplicados con nanopartículas de dióxido de titanio.

Dichos autores reportaron que las semillas que se trataron con nanopartículas produjeron plántulas con mayor peso seco (73%) y aumento en la concentración de clorofila (45%), en comparación con las plantas testigo que no recibieron nanopartículas (Giornadi *et al.*, 2012). Resultados similares reportaron (Knot *et al.*, 2012), al aplicar este nanomaterial con espinaca. Considerando lo antes señalado se deduce que influye favorablemente en mayor concentración de clorofila. Al analizar los resultados del bioensayo I, demuestra un similar efecto al aplicar NPs de fierro, presenta el 20% mayor el índice de clorofila al aplicar 25 ppm de NpsFeO por la raíz, al aplicar 50 ppm vía raíz tuvo 1.6% y 50 ppm vía foliar se obtuvo 4.8% mayor.

Un estudio realizado por Shailesh *et al.* (2013) sobre aplicación de nanopartículas de óxido de hierro en cultivo de frijol mungo (*Vigna radiata*) reporta que al aplicar 50 ppm a través por vida foliar, presentó un efecto positivo en biomasa húmeda y seca, longitud de brotes y biomasa seca de raíz, con este resultado menciona que este método a través por vía foliar es factible para el uso de nanopartículas con resultados prometedores para las plantas.

Con estos estudios, se pudo corroborar del bioensayo efectuado al aplicar NPs de FeO en 25 y 50 ppm por dos vías a la raíz y foliar, se obtuvieron mayor efecto con relación al testigo en las variables morfofisiológicas. Aunque, por comparaciones no

existen diferencias significativas, pero con la tendencia numérica nos demostró un efecto positivo en el desarrollo del cultivo de tomate.

Para determinar el análisis más a fondo sobre la importancia del elemento mineral el hierro, es necesario dar un enfoque sobre las funciones que realiza bioquímicamente. Menciona (Juárez *et al.*, 2007) que este elemento se representa en los vegetales formando parte de numerosos sistemas enzimáticos. Dentro de ello se encuentran en: citocromos, complejos proteicos hierro-porfirínicos, que son constituyentes de los sistemas redox de los cloroplastos, las mitocondrias y en la cadena redox de nitrato reductasa.

Las catalasas que intervienen en la fotorespiración y en el ciclo de Calvin o vía glicolítica y facilitan la dismutación de H_2O_2 en H_2O y O_2 en los cloroplastos y por otro lado, la hemoglobina enzima implicada en el proceso de fijación del nitrógeno, catalizan la polimerización de los fenoles a lignina en la rizodermis y endodermis de las raíces. Con la función de hierro que lleva acabo a nivel celular, esto indica que si presenta ausencia del elemento, dará lugar menor tamaño de planta tanto altura y biomasa y, al aplicar nanopartículas de hierro a concentraciones de 25 y 50 ppm, adquiere la planta con más facilidad el elemento por su tamaño a escala muy pequeña y por el método de aplicación. Esto da un resultado buen crecimiento, desarrollo de biomasa del cultivo de tomate.

Por su característica principal del sustrato zeolita de la capacidad de retener agua y en cambio el sustrato perlita presenta mayor drenaje, por tal motivo al combinar los dos sustratos en diferentes proporciones regula el drenaje y retención de agua. Dado el resultado del drenaje de cada tratamiento, donde se utilizó el 30% de zeolita y 70% de perlita se obtuvo un drenaje adecuado el 29%, no rebaso de la regla que el drenaje se debe manejar del 10 al 30%, para evitar el lavado y la salinidad del sustrato.

El drenaje es el factor determinante para su buen desarrollo de la planta, ya que si hay mayor drenaje, el sustrato se estará lavando y no retiene los nutrientes

para que la planta pueda absorber, pero si el sustrato retiene toda la solución nutritiva al no drenar causará la concentración de sales en el sustrato. Mencionan Goykovic *et al.* (2007) La salinidad produce efectos positivos y negativos en las plantas de tomates. Pero gran parte son efectos negativos, la salinidad afecta desde los primeros estados fenológicos de la planta. La germinación se reduce y se alarga el tiempo, El crecimiento de las raíces disminuye y por tanto baja la capacidad de absorción de agua y nutrientes. En caso de los frutos se ven afectados gravemente tanto su número total. El grado de impacto de las sales en el cultivo depende del estado de desarrollo en que se encuentre el cultivo, siendo las etapas jóvenes más propensos que las etapas adultas.

Por otra parte, Urbina *et al.* (2011) reportan que al utilizar la zeolita en hidroponía es una nueva alternativa ya que demuestra que este mineral utilizado como sustrato retiene mayor cantidad de nutrientes minerales para su posterior absorción a las plantas, obteniendo buen desarrollo del cultivo al utilizar menor concentración de la solución nutritiva con respecto al sustrato de tezontle como testigo, en donde ocuparon mayor concentración de solución nutritiva. Esto indica que el uso de zeolita es muy favorable para el sustento de la plantas.

Un estudio realizado por el NIFAP, en diferentes estados en donde sustituyeron el 25% de fertilizante nitrogenado por el sustrato mineral zeolita, reportaron que tuvieron efectos significativos y, reduciendo el costo de fertilizante con un 5% menos, estos trabajos realizados efectuaron con cultivos básicos (paredes *et al.*, 2013).

El resultado expuesto con el uso de sustrato zeolítico se obtuvieron mayor cantidad de flores durante el punto máximo de presencia de flores rebasando al testigo. Nuestros resultados concuerdan con otros estudios, un estudio realizado en ecuador menciona que la utilizar el 25% y 30% de zeolita en el cultivo de cacao promovieron mayor cantidad de flores y fructificación, con este resultado obtuvieron mayor rentabilidad (Sánchez *et al.*, 2012).

Con los resultados expuestos del bioensayo II, al analizar la variable rendimiento del cultivo presentó mayor rendimiento en las mezclas de dos sustratos zeolita/perlita comparando con el testigo que fue 100% de perlita. Podemos afirmar que el sustrato de zeolita es una buena alternativa para el uso de producción de cultivos sin suelo.

VIII. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de la investigación realizada, se concluye que las nanopartículas de óxido de hierro promueven el crecimiento, desarrollo y producción de biomasa en las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), aunque no todas las variables morfofisiológicas tuvieron diferencias significativas, con esto hay un indicio muy relevante como una nueva alternativa para el uso de nanopartículas en el área de nutrición.

Respecto al empleo de la zeolita mineral como sustrato para las plantas es una de las grandes alternativas muy bondadosas en el área de producción de cultivos sin suelo. De acuerdo a los resultados presentados en la investigación en el uso de zeolita promovieron el crecimiento, desarrollo y producción de biomasa y, además, en producción de frutos, presentaron una mayor efectividad. Donde con la mezcla de zeolita: perlita (30:70) presentó mayor producción de tomate, aunque estas variables no mostraron diferencias significativas, pero en relación a tendencia numérica indica un resultado favorable.

Con respecto a la hipótesis planteada entre las nanopartículas y la zeolita se cumplen en sus respuestas fisiológicas en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de tomate. Pero se encontraron variables que no cumplen con lo supuesto porque no existen diferencias significativas.

Es necesario seguir realizando este tipo de trabajos para continuar evaluando y validando, tanto el uso y efecto de nanopartículas metálicas, como el efecto de la zeolita aplicada en mezclas con otros materiales para ser empleado en condiciones hidropónicas de agricultura protegida sustentable.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, D., Luévano, G. y Moreno, R. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno. Revista Mexicana de Agronegocios. México. 13 p.
- Alamillo, L.V. 2013. Remoción de colorantes orgánicos azul índigo y tartrazina, en solución acuosa, empleando nanopartículas de hierro soportadas en piedra volcánica de óxido de hierro (tezontle). Tesis de licenciatura. UNAM. Toluca Lerdo, México. 55 p.
- Anicua, S., Gutiérrez, C., Sánchez G., Ortiz S., Volke H. y Rubiños P. 2009. Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. Colegio de Posgraduados, Texcoco. México. 35:2.147-156.
- Arcos, B., Benavides, O., y Rodríguez, M. 2011. Evaluación de dos sustratos y dos dosis de fertilización en condiciones hidropónicas bajo invernadero en lechuga *Lactuca sativa* L. Revista de Ciencias Agrícolas, 28:2. 95-108.
- Bosch, P., Schifter, I. 1997. La zeolita una piedra que hierve. Fondo de cultura económica. 2^{da} edición. México. 66 p.
- Brouwer, C., Elliot M., Kovalchuk, S. 2011. El Tomate, sus Datos e Historia. University System, U.S. Department of Agriculture y the County Commissioners Courts of Texas cooperating. USA. 2 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Edición agrotecnias S.L. 1^{ra} edición. Madrid, España. Pp 218-230.
- Calleja C. 2009. La importancia de las zeolitas. Universidad de Salamanca. España. 211-277 p.

- Carrillo, G., González, C. 2009. La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Texcoco, México. 2:2. 63 p.
- Carrillo, G., Martínez, G., González, C. 2014. Nanotecnología en la actividad agropecuaria y el ambiente. Colegio de postgraduados. 1ª edición. México. Pp 3- 79.
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Sandoval-Villa, M., Bugarín-Montoya, R., Robles-Bermúdez, A., y Juárez-López, P. 2013. Sustratos en la horticultura. Revista Biociencias. 2:2.
- Dubey, A.; Mailapalli, D.R. 2016. Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. In Sustainable Agriculture Reviews. Springer International Publishing. Pp 307-330.
- Esquivel, M. D. 2011. Síntesis, caracterización y aplicaciones de materiales periódicos mesoporosos organosilícicos. Córdoba. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 292 p.
- FAO, 2015. Medios y técnicas de producción.
<http://www.fao.org/docrep/005/S8630S/s8630s07.htm>
- Flores, M., Galvis S., Hernández, M., León G., Payán Z. 2007. Efecto de la adición de zeolita (Clinoptilolita y mordenita) en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el crecimiento de la avena. 32:10. 692-696 pp.
- Fraceto, L.F.; Grillo, R.; De Medeiros, G.A.; Scognamiglio, V.; Rea, G.; Bartolucci, C. 2016. Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?. Frontiers in Environmental Science. Pp 4:1-5.

- González, C., Gómez, M., Muñiz, E., Valencia, E., Gutiérrez G., Figueroa L. 2012. Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizante en el estado de Guerrero. INIFAP. Guerrero, México. 3:6. 1129-1144 p.
- Goykovic C., V., Saavedra del Real, G. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *Idesia (Arica)*, 25:3. 47-58.
- Grillo, R.; Abhilash, P.C.; Fraceto, L.F. 2016. Nanotechnology Applied to Bio-Encapsulation of Pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. Pp 1231-1234.
- Gutierrez, W. C E. 2006. Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial.
- Huerta, H. A. 2012. Agricultura protegida. Fundación produce Veracruz. México. 35 p.
- 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.
- Jeyasubramanian, K.; Thoppey, U.U.G.; Hikku, G.S.; Selvakumar, N.; Subramania, A.; Krishnamoorthy, K. 2016. Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*. Pp 15451-15459.
- Juárez, L., Bugarín, M., Castro B., Sánchez, M., Cruz, C., Juárez R., Alejo S., Balois M. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit-Universidad Autónoma Chapingo. México. 8. 21-27 p.

- Juárez, S., M., Cerdán S., M. D. M., Sánchez S.A. 2007. Hierro en el sistema suelo-planta. Química del Sistema Suelo Planta. Facultad de ciencias. Universidad alicante. España. Pp 4-13.
- Kottegoda, N.; Munaweera, I.; Madusanka, N.; Karunaratne, V. 2011. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. Current Science (Bangalore). Pp 73-78.
- Landis, T. D. 1990. Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. USDA. EUA. 60-70 p
- Lira-Saldivar, R. H., Méndez-Arguello, B. 2016. Agronotecnología. Nueva Frontera de la Revolución Verde. México. 271 páginas.
- Liu, R. Q.; Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment. Pp 131-139.
- Martínez, F. G. S/f. Hierro, disponibilidad, funciones y síntomas de deficiencia. Agroestrategias. Rosario, Argentina. 1 p. disponible en línea: <http://www.agroestrategias.com/pdf/Fisiologia%20-%20Aspectos%20Fisiologicos%20del%20Hierro.pdf>
- Medina, M. C., Cano, P. R. 2001. Contaminación por nitratos en agua, suelo y cultivos de la Comarca Lagunera. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. 2:1. 9-14.
- Mishra, S.; Singh, H.B. 2015. Biosynthesized silver nanoparticles as a nanoweapon against phytopathogens: exploring their scope and potential in agriculture. Applied microbiology and biotechnology. Pp 1097–1107.
- Mora, L. 1999. Sustratos para cultivos sin suelo o hidroponía. In XI congreso nacional agronómico, San José Costa Rica. 97.

- 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.
- Ostrooumov, M. 2011. Zeolitas de México: diversidad mineralógica y aplicaciones. Universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. 9 p.
- Paredes, M. R., María, R. A., Osuna, C. E. S. Alamilla, G. P., y Mandujano, B. A. 2010. Zeolita natural. Alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporal en México. INIFAP. México. 35 p.
- Petranovskii, V., Hernández, M. A. 2015. Zeolita – una roca útil. Departamento de Investigación en Zeolitas, Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla. México. 10 p.
- Prasad, R.; Kumar, V.; Prasad, K.S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. Pp 705-713.
- Razzaq, A; Ammara, R.; Jhanzab, H.M.; Mahmood, T.; Hafeez, A.; Hussain, S. 2016. *Journal of Nanoscience and Technology*. *Journal of Nanoscience and Technology*. Pp 55-58.
- Resh, H.M. 2006. Cultivos hidropónicos. Mundi prensa. 5^{ta} edición. Madrid, España. Pp 359-363.
- 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*. Pp 1137-1144.
- SAGARPA. 2010. Monografía de cultivos (tomate). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA. México. 10 p.

- SAGARPA. 2012. Agricultura protegida. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SARGARPA. México.
- SAGARPA. 2016. Exportaciones de tomate. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 362.
- Samperio, R. G. 2004. Un paso más en la hidroponía. Diana S.A. de C.V. 1^{ra} edición. México. Pp 66-70.
- Sánchez, M., Vásconez, M. Abril, S., Vera, C., Ramos, R., Díaz, C., Torres, N., Jácome L. Zeolitas en la fertilización química del cacao ccn-51 asociado con cuatro especies maderables. Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Campus Finca Experimental "La María". Mocache, Los Ríos, Ecuador.
- Shailesh, K. D., Pramod M., Rajashri K., Anand K. 2013. Effect of nanoparticles suspension on the growth of mung (*Vigna radiata*) seedlings by foliar spray method. Nanotechnology Development. 3:1. 5 p.
- Toro, F. D. J. C., Benítez, L. M. L., Herrera, M. I. Á. 2006. La zeolita en la mitigación ambiental. Red Revista Lasallista de Investigación. 3:1. 30-34 p.
- Vásquez, H. A. y Zetina, L. R. 2014. Uso de zeolita para reducir costos de fertilización química en agricultura. INIFAP. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. México.
- Villareal, N., Barahona, A., Castillo, O., 2015. Efecto de zeolita sobre la eficiencia de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de arroz. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). Panamá. Pp 316-321.
- Virta, R. L. 2002. Zeolites. US Geological Survey Minerals Yearbook. Pp 84:1-3.

- Wang, S.; Liu, H.; Zhang, Y.; Xin, H. 2015. Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*. Pp 554-561.
- Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., Liu, X., Feng, W., White, J.C. y Xing, B. 2012. Xylem and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environmental science y technology*.
- Yadollahi, A.; Arzani, K.; Khoshghalb, H. 2009. The role of nanotechnology in horticultural crops postharvest management. In *Southeast Asia Symposium on Quality and Safety of Fresh and Fresh-Cut Produce*. Pp 49-56

X. ANEXOS

Figura 14. Invernadero de media tecnología en donde se realizó el bioensayo I.



Figura 15. Aplicación de nanopartículas de óxido de hierro por dos vías A) base del tallo, B) foliar.



Figura 16. Comparaciones de plantas representativas de cada tratamiento.



Figura 17. Evaluación de área foliar de las plantas de tomate.



Figura 18. Casa sombra donde se realizó el bioensayo II.



Figura 19. Plantas de tomate (*solanum lycopersicum*) establecido en macetas sobre en vigas metálicas en casa sombra. A) inicio del ciclo, B) final del ciclo de producción.



Figura 20. A) Medición de fotosíntesis, B) cosecha de tomate.



Figura 21. Toma panorámica en la que se puede apreciar las plantas representativas de cada tratamiento.

