

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Crecimiento, Producción de Biomasa y Rendimiento de *Capsicum annuum* L., Cultivado en Sustrato de Zeolita y Aplicación de Nanopartículas de Fierro

Por:

ERNESTO SALVADOR RAMÍREZ LUGO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

**Crecimiento, Producción de Biomasa y Rendimiento de *Capsicum
annuum* L., Cultivado en Sustrato de Zeolita y Aplicación de
Nanopartículas de Fierro**

POR:

ERNESTO SALVADOR RAMÍREZ LUGO

TESIS

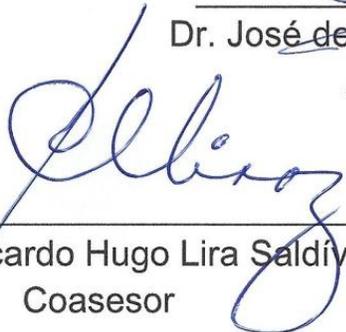
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

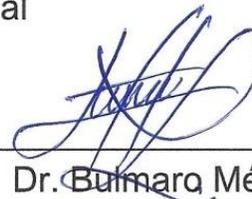
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún
Asesor Principal



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar
Coasesor



Dr. Bismarq Méndez Argüello
Coasesor



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México, Junio, 2017

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Coordinación de
Ingeniería

DEDICATORIAS

A MIS PADRES

Sra. Juana Lugo Laguna y Sr. Blas Ramírez Zavala

Por ser los ángeles incondicionales que siempre han creído en mí, brindándome su apoyo y plena confianza en cada uno de los momentos más difíciles a lo largo de mi vida, siendo mi mayor motivación para realizar cada una de mis metas planeadas, mostrándome siempre el buen camino e instruyéndome a no dejar de luchar por mis sueños, inculcándome valores, enseñanzas, consejos que a su debido tiempo llegaron a convertirme en un profesionalista de buenos principios.

A MIS HERMANOS

Por ser un soporte incondicional en los momentos de declive en mi carrera, brindándome apoyo moral, cariño, amor y comprensión, sin importar la distancia que nos separa siempre mostrándose interesados en saber de mi situación.

En especial mi hermana **Blanca Estela** quien con mucho cariño y sacrificio pudo sacarme adelante en los momentos en que más lo requerí.

A mi hermano **Juan Víctor** por todo el apoyo económico y moral que recibí de parte suya.

A mis hermanas **Dalia Liliana** y **Yohana Jazmín** quienes siempre mostraron su apoyo e interés por mi persona.

A MIS AMIGOS DE GENERACIÓN

Sólo me queda agradecer a todos mis amigos en general por todos esos bellos momentos que se quedarán grabados en mi memoria donde compartimos alegrías, tristezas, aventuras, diversión y sobre todo por su compañía incondicional.

A MIS AMIGOS DEL BARRIO

Por darme siempre ánimos en los momentos más frágiles de mi carrera y a todas esas personas que han rodeado mi vida, quienes siempre han mostrado su apoyo moral, puesto que me consideran un ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de terminar mi carrera de forma adecuada, cuidándome e iluminando mi camino en cada momento, brindándome salud y poniéndome al lado a las dos personas más maravillosas de esta vida como lo son mis padres, quienes son parte de esta meta cumplida.

A mi UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARÍA ANTONIO NARRO por darme la oportunidad de formarme como profesionista y a si saldar una meta más en vida, recibiendo apoyo necesario durante mi formación académica y dándome la oportunidad de viajar al extranjero en busca de adquisición de nuevos conocimientos, de tal manera que gracias a esta grandiosa institución hoy se forma un nuevo profesionista para afrontar los retos que demanda el campo mexicano, por lo tanto ser BUITRE es el más grande orgullo.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar y Dr. Bulmaro Méndez Arguello, por todo el apoyo recibido durante el transcurso de este trabajo, brindándome la confianza y dándome la oportunidad de desempeñar mis conocimientos adquiridos en mi formación, ya que sin su confianza este trabajo no hubiese sido posible.

Al Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún por todo el apoyo recibido en el proceso de mi titulación, más que un profesor es mi amigo el cual siempre ha mostrado disposición y apoyo cuando éste ha sido requerido.

Al Dr. Miguel Urrestarazu Gavilán y al M.C. Víctor Manuel Gallegos Cedillo por haberme permitido participar de forma directa en sus proyectos de investigación durante mi estancia en la Universidad de Almería, España, en especial al M.C. Víctor Manuel Gallegos Cedillo quien siempre ha mostrado una disposición por aclarar mis dudas cuando estas se han presentado.

A mis amigos de generación por formar parte de mi vida durante estos 5 años de convivencia juntos, donde hemos pasado alegrías, tropiezos, aventuras, parrandas, siendo una gran familia por todo el apoyo recibido, la compañía y sobre todo el ser uno de los grupos más sobresalientes de la carrera gracias a la competitividad que mostrase cada integrante del grupo.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN	VI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVO GENERAL	3
2.1 Objetivos específicos	3
III. HIPOTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 Cultivo de chile ancho en México.....	4
4.2 Importancia económica del cultivo de chile ancho	5
4.2.1 Importancia económica del pimiento	5
4.3 Clasificación taxonómica del cultivo de <i>Capsicum annum</i>	6
4.3.1 Clasificación botánica del cultivo de chile ancho	6
4.4 Labores culturales de <i>Capsicum annum</i>	7
4.5 Fertilización.....	9
4.6 Plagas del cultivo <i>Capsicum annum</i>	10
4.6.1 Enfermedades del cultivo <i>Capsicum annum</i>	11
4.6.2 Virosis en cultivo de <i>Capsicum annum</i>	12
4.7 Sustratos agrícolas	13
4.7.1 Clasificación de los sustratos	14
4.8 Situación en el uso de fertilizantes	17
4.8.1 Reducción de las pérdidas de fertilizantes nitrogenados.....	18
4.8.2 Zeolitas naturales como sustratos agrícolas.....	19
4.8.3 Zeolitas; una alternativa para reducir las pérdidas de fertilización	20
4.8.4 Características generales de la zeolita	21
4.8.5 Propiedades de las zeolitas	22

4.8.6 Usos de la zeolita en la agricultura	23
4.8.7 Zeolita como sustrato hidropónico	24
4.9 Nanotecnología (NT).....	25
4.9.1 Nanotecnología en la agricultura	26
4.9.2. Importancia de las nanopartículas	27
4.9.3 Aplicación de las nanopartículas en la agricultura	28
4.9.4 Clasificación de los nanomateriales en la agricultura	29
4.9.5 Nanopartículas usadas en la agricultura.....	30
V. MATERIALES Y MÉTODOS	33
5.1. Localización del sitio experimental.....	33
5.2 Distribución de los tratamientos	34
5.3 Manejo del cultivo	35
5.4 Preparación de la solución con nanopartículas	37
5.5 Aplicación de nanopartículas a las plantas de pimient.....	37
5.6. Metodología para la evaluación de las variables	38
5.7 Análisis estadístico	40
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
VII. DISCUSIÓN	53
VIII. CONCLUSIÓN	59
IX. LITERATURA CITADA	61

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidad de fertilizante que se usó en el bioensayo 1.	9
Cuadro 2. Cantidad de fertilizante que se usó en el bioensayo 2.	10
Cuadro 3. Distribución de tratamientos de NPsFe y MPsFe aplicadas al follaje y en drench a plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) con fertilización incompleta y bajo condiciones controladas de invernadero.....	34
Cuadro 4. Distribución de los tratamientos de las diferentes proporciones de zeolita mezclada con perlita en plantas de chile ancho (<i>Capsicum annuum</i>) aplicando fertirriego. Z= Zeolita, P= Perlita.....	34
Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza de las variables de los tratamientos sometidos a NPsFe y MPsFe a diferentes concentraciones aplicadas vía foliar y en drench.	41
Cuadro 6. Comparaciones de medias lectura intermedia, en respuesta fisiológica de plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) aplicando nanopartículas a diferentes concentraciones de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe aplicadas vía foliar y en drench.....	45
Cuadro 7. Resultados del análisis de varianza de las variables de estudio en plantas de chile ancho (<i>Capsicum annuum</i>) evaluadas en mezclas de sustrato zeolítico.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras para el manejo de agricultura protegida que se utilizaron para realizar la presente investigación (A) Invernadero y (B) casa sombra.	33
Figura 2. Sistemas utilizados y adaptados para el experimento en plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>).....	36
Figura 3. Manejo del cultivo en la primera etapa.	37
Figura 4. Aplicación de nanopartículas en plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) al follaje y en drench.....	38
Figura 5. Crecimiento promedio de las plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) sometidas a aplicaciones foliares y en drench de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe a concentraciones de 25 y 50 ppm.....	41
Figura 6. Crecimiento promedio de la raíz de plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) sometidas a aplicaciones foliares y en drench de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe a concentraciones de 25 y 50 ppm.	43
Figura 7. Muestra el análisis de varianza de las variables morfofisiológicas determinadas en las plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>); A) altura de la planta, B) área foliar, C) longitud de raíz, D) Peso fresco de hojas. Literales diferentes indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal no son significativos entre sí, la barra representa el error estándar de la media.	44
Figura 8. Resultados obtenidos del intercambio gaseoso en plantas de pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) sometidas a aplicaciones de NPsFe y MPsFe. A) Fotosíntesis dentro del invernadero, B) Conductancia estomática dentro del invernadero, C) Fotosíntesis fuera del invernadero y D) Conductancia estomática fuera del invernadero.....	46
Figura 9. Crecimiento promedio de las plantas de chile ancho (<i>Capsicum annuum</i>) trasplantado en diferentes mezclas de zeolita y perlita.	47

Figura 10. Análisis de varianza de las variables morfofisiológicas analizadas en las plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*); A) Altura de la planta, B) Diámetro del tallo, C) Índice relativo de clorofila, D) Numero de frutos. Literales diferentes indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal no son significativos entre sí, la barra representa el error estándar de la media. 48

Figura 11. Crecimiento promedio de la raíz de plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) desarrolladas en diferentes mezclas de zeolita (clinoptilolita) y sustrato inorgánico (perlita). 49

Figura 13. Resultados del intercambio gaseoso en plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) desarrolladas en diferentes proporciones de zeolita mezcladas con sustrato inorgánico aplicando fertirriego. A) Fotosíntesis y B) Conductancia estomática. 52

RESUMEN

Crecimiento, Producción de Biomasa y Rendimiento de *Capsicum annuum* L., Cultivado en Sustrato de Zeolita y Aplicación de Nanopartículas de Hierro

Este trabajo experimental realizado en el verano de 2016, consistió en dos bioensayos. El primero fue en un invernadero tipo túnel modificado de tecnología media, y el segundo en una estructura denominada casa sombra; ambos dentro de las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, Coahuila. En el primer bioensayo se establecieron siete tratamientos para evaluar la respuesta en crecimiento, desarrollo y producción de biomasa en plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) con la aplicación de nanopartículas de hierro (NPsFe). En el segundo bioensayo se establecieron siete tratamientos para valorar la influencia de la zeolita en el crecimiento, desarrollo, producción de biomasa y rendimiento en plantas de *C. annuum*. Cuantitativamente las aplicaciones de NPsFe a concentración de 25 y 50 ppm promovieron una respuesta favorable, ya que se mostró superior al resto de los tratamientos. Por otra parte, los sustratos que contenían zeolita promovieron mayor crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas de chile.

Palabras clave: Nutrición vegetal, nanopartículas, nanotecnología, aluminosilicatos.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida (AP) es aquella que se desarrolla bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivadas. Esta práctica se basa en un sistema de producción agrícola implementado como una opción para aumentar la producción en espacios reducidos, limitar las interacciones negativas con el medio ambiente y producir fuera de temporada; entre otras ventajas, permite el combate exitoso de plagas y enfermedades, un mejor posicionamiento del producto en el mercado, generando evidentemente un mayor ingreso económico para los productores (FAO-SAGARPA, 2007).

Sin embargo es evidente que para alcanzar altos índices de producción en la agricultura se realiza uso desmedido de fertilizantes químicos que provocan desbalances en el sistema suelo-planta. Los suelos de los invernaderos están sufriendo un proceso de degradación en sus características físico-químicas y en la acumulación de metales pesados (Ramos-Miros, 2002). La agricultura intensiva no sólo se le exige la producción de frutas y verduras con características organolépticas de máxima calidad, también se le exige el ser producidas sin contaminar al medio ambiente. Uno de los retos de la última década es concientizar y crear una relación de respeto del productor hacia el medio ambiente, para que de esta manera se pueda satisfacer la demanda de los consumidores. Es necesario encontrar sistemas de producción apegados a evitar el uso de agroquímicos, siendo uno de los caminos la agricultura orgánica (Álvarez et al., 2005). Ésta se define como un método agrícola en el que no se utilizan fertilizantes ni plaguicidas sintéticos (Sinha, 2008).

En relación a la fertilización de los cultivos, tradicionalmente se ha llevado a cabo con fuentes inorgánicas debido a que se adquiere una mayor solubilidad, sin embargo, éstos pueden originar un daño a la salud humana, además de incrementar los costos de producción de los cultivos. Hoy en día existe un creciente interés por utilizar fuentes orgánicas para abonar los suelos, en un intento de regresar los sistemas naturales a la producción orgánica. En las últimas décadas se ha retomado

la importancia en el uso de abonos orgánicos debido al incremento de los costos de los fertilizantes químicos y al desequilibrio ambiental que estos ocasionan, además de la necesidad de preservar la materia orgánica en los sistemas agrícolas, aspecto fundamental relacionado a la sostenibilidad y productividad de la agricultura (Ramírez, 2005).

En este sentido, es importante buscar alternativas para aumentar la eficiencia de la fertilización en la agricultura como es el uso de la zeolita. La incorporación de zeolitas naturales en la formulación de fertilizantes minerales puede ser una alternativa para favorecer la retención de NH^{+4} y otros cationes provenientes de los fertilizantes (He et al., 2008). De Campos et al. (2013) menciona que las zeolitas pueden actuar ya sea como abonos de liberación lenta incrementando el uso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo o como mejoradores de suelo para aumentar la capacidad de retención de humedad.

Dentro de la nueva revolución verde que se pretende implementar en la agricultura intensiva, se está introduciendo de manera considerable en el sector agrícola la aplicación de la agronanotecnología. Esta novedosa tecnología consiste en manipular nanopartículas y/o nanoelementos con el objetivo de producir insumos que sean aplicados en la agricultura intensiva, dado el caso de la fabricación de nanosensores, formulación de nanoplaguicidas encapsulados para una liberación más eficaz y controlada, elaboración de nanofertilizantes y nanoherbicidas, pretendiendo obtener un uso más eficiente en las aplicaciones de los productos ya mencionados (Lira Saldívar y Méndez Arguello 2016).

Se considera a la agronanotecnología como un conocimiento emergente que procura encontrar sistemas de producción ecológica para mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de las prácticas agrícolas modernas (Ditta et al., 2015; Grillo, et al., 2016), incluyendo el control de plagas y enfermedades el ataque de plagas y enfermedades de los cultivos (Patel et al., 2014). Esta tecnología se orienta a disminuir la cantidad empleada de agroquímicos sintéticos, reduciendo de esta manera la generación de residuos contaminantes, buscando incrementar el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Servin et al., 2015).

II. OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto en el crecimiento, producción de biomasa y rendimiento de plantas de *Capsicum annuum* sometidas a diferentes concentraciones de nanopartículas de hierro y cultivadas en sustratos conteniendo zeolita y perlita.

2.1 Objetivos específicos

- 1.- Evaluar el efecto de 25 y 50 ppm de NPs y micropartículas de Fe vía Drench y foliar, en el crecimiento de las plantas de pimiento.
- 2.- Evaluar el comportamiento morfofisiológico de plantas de chile ancho cultivadas en sustratos conteniendo diferentes proporciones de zeolita y perlita.

III. HIPOTESIS

Las NPsFe y la zeolita tendrán una influencia en las plantas de chile, pudiendo afectar de manera positiva o negativa, variables morfofisiológicas como crecimiento, producción de biomasa y rendimiento de frutos en plantas de *Capsicum annuum*.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Cultivo de chile ancho en México

México es uno de los principales centros de origen de la especie *Capsicum annuum*, a la que pertenecen una diversidad importante de chiles de consumo diario, como lo son: jalapeño, ancho, mirasol, piquín, serrano, anaheim o chilaca, caribe, pimiento morrón (González-Estrada et al., 2004). México es el principal país productor y exportador de chile verde a nivel mundial, y el sexto en chile seco, siendo el cultivo hortícola más importante.

Por lo que respecta al mercado nacional de los principales chiles que se producen en México, el más importante, por su superficie sembrada, superficie cosechada, volumen de producción y valor económico, el chile jalapeño ocupa el primer lugar, seguido del chile ancho y serrano (Pérez-Miranda, 2009). El chile es cultivado por regiones, en algunas se opta por cultivar variedades nativas, pero al igual se incluyen variedades similares que presentan características comunes.

AM-VR (Ancho Mulato-Villa de Reyes). Es una variedad que se considera de ciclo intermedio de 44-48 días de floración después del trasplante, 115 días de cosecha en fruto verde y 140 días en promedio a inicio de cosecha en fruto maduro-café. Su producción está centrada para corte en verde donde se pueden efectuar de 3-5 cortes, para el caso de mercado de deshidratación o seco se efectúan dos cortes como mínimo. Es una planta que se comporta de manera aceptable bajo variados sistemas de producción, su mayor potencial lo manifiesta bajo condiciones de fertirrigación (INIFAP, 2005).

Allende. Variedad de chile ancho que presenta una altura mediana-alta, fruto de excelente tamaño, color obscuro (SAGARPA, 2012).

Caballero. Excelente híbrido para mercado nacional o exportación a consecuencia de la buena calidad que presenta, rendimiento, al tipo de fruto que presenta (12-16

cm de longitud), color verde intenso, en maduración adquiere un color rojizo escarlata, y paredes gruesas. La concentración de capsaicina es media, brindándole un picor característico a este tipo de chiles (INIFAP, 2005).

Criolla. Son cultivares nativos (criollos) o bien, son introducidos de otras regiones, que se cultivan y establecen por años en una región, utilizándose en plantaciones comerciales, por lo regular este material es de bajo rendimiento y mala calidad, ocasionado por la mezcla de subtipos, presentando variación morfológica y diversidad de forma de frutos, otra característica que presenta; es que presenta susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades, provocando mala calidad del producto en el mercado (INIFAP, 2005)

4.2 Importancia económica del cultivo de chile ancho

El cultivo de chile en México es de gran relevancia por los ingresos económicos que genera a partir de su comercialización, siendo de alto consumo a nivel nacional. El cultivo de chile en nuestro país es muy importante debido a la gran riqueza natural y diversidad genética ya que existen gran variedad de chiles, catálogos como variedades, tipos y subtipos adaptados a diferentes condiciones de clima y suelo (Huerta de la Peña et al., 2007).

El género *Capsicum* incluye un promedio de 25 especies y al menos cinco de éstas son cultivadas en mayor o menor grado, pero en el ámbito mundial, casi la totalidad del chile que se consume está dado por la especie *C. annum*. Es el segundo cultivo hortícola más importante, después del tomate, por lo que se ubica como uno de los alimentos principales de la población, es ampliamente consumido como: platillo principal, condimento, encurtido y ensalada (INIFAP, 2005).

4.2.1 Importancia económica del pimiento

El pimiento ocupa un lugar destacado en la producción hortícola, debido a que cuenta con una importancia económica muy significativa, basada en la

especialización de la producción, en el número de variedades cultivadas y en la competitividad de las exportaciones. De tal manera que el pimiento dulce es uno de los cultivos hortícolas de mayor consumo en el mundo, con una producción global de 28, 070, 851 toneladas, repartidas en un área total de 1, 814, 237 ha de cultivo. El producto final del cultivo de pimiento es ampliamente cosechado en etapa inmadura o bien en verde como vegetal para relleno y ensaladas. La demanda de este producto ha venido en ascenso debido al incremento de la población mundial, es por eso que la cosecha ha ido en aumento año tras año, el inconveniente que se presenta es que las variedades tradicionales no producen el suficiente rendimiento como para satisfacer la demanda mundial de este producto (Malik et al., 2011).

De tal manera que el uso de híbridos ha mostrado una respuesta a favor, puesto que muestran un potencial en rendimiento, la actual demanda ha sido concretada; el pequeño percance que presentan estas planta, es la demanda de más mano de obra e incrementan su demanda en nutrición (Hiremath et al., 2006).

4.3 Clasificación taxonómica del cultivo de *Capsicum annum*

De acuerdo a (SAGARPA, 2012), el cultivo de chile ancho se encuentra posicionado dentro de la siguiente clasificación taxonómica.

División..... Magnoliophyta
Clase..... Magnoliopsida
Orden..... Solanales
Familia..... Solanaceae
Género..... *Capsicum*
Especie..... *annum* L.

4.3.1 Clasificación botánica del cultivo de chile ancho

Hojas. El número de hojas se observa controlado por las condiciones climáticas que se manifiesten y el genotipo, generalmente se desarrollan de 8-15 hojas antes de la

aparición de la primera flor. Las hojas varían de tamaño, forma y color siendo la mayoría simples, enteras y simétricas; además de ser planas, suaves y pueden tener o no pubescencia (Bradford, 2004).

Tallo. Es erecto, de tipo herbáceo, ramificado y circular a la madurez en la sección media. Puede presentar características tales como; puede ser glabro o pubescente y de crecimiento determinado o indeterminado (Nuez et al., 2003)

Raíz. El cultivo de chile presenta una raíz pivotante, enriquecida de muchas raíces secundarias largas y fibrosas. Adquieren una profundidad de 30-60 cm, con una exploración lateral que se extiende hasta 50 cm del eje. El sistema radicular representa el 7-17% del peso total de la planta adulta, esto varía dependiendo del genotipo, las condiciones en que se desarrolla el cultivo y las relaciones fuente-demanda (Nuez et al., 2003)

Flor. Es una flor pentámera, hermafrodita e hipógina, ubicada usualmente en las axilas. *Capsicum annuum*, inicia la floración con una flor en el primer nudo axilar, después la flor se forma en cada nudo, en progresión geométrica (Bosland y Votava, 2000).

Fruto. Es una baya constituida por un pericarpio grueso, succulento y un tejido placentario al cual las semillas van unidas. La pungencia se debe a la presencia de capsaicinoides en concentraciones de 0.7% de la biomasa total del fruto en los tipos más picantes (Nuez et al., 2003).

4.4 Labores culturales de *Capsicum annuum*

Podas. Poda de formación. La poda es una práctica cultural que se emplea para obtener plantas más equilibradas y vigorosas, de tal manera que los frutos no queden ocultos entre el follaje pero al mismo tiempo protegidos por él, de insolaciones, y para mantenerlos aireados y libres de condensaciones (Molina, 2000).

Poda de fructificación. El realizar esta clase de poda lleva como objetivo mantener la forma de la planta, regulando la producción para que sea abundante y de calidad. Al realizar la poda de fructificación se eliminan las brotaciones mal ubicadas, enfermas, hojas, frutos, a través del aclareo (Suquilanda, 2002).

Desoje o aclareo de hojas. Las hojas se encargan de transformar la sabia bruta en sabia elaborada a través de la fotosíntesis, en ocasiones las plantas presentan un exceso de hojas que cubren parcialmente la planta, esta acción ocasiona que se presente un ambiente húmedo en el interior e impide que la luz pueda llegar a las hojas, yemas, flores y frutos. Esta poda ayuda a eliminar hojas afectadas por enfermedades, plagas, hojas no funcionales y hojas viejas, generalmente siempre se inicia empezando por la parte inferior de la planta (Suquilanda, 2002).

Tutoreo. Es una actividad imprescindible para mantener la planta erecta, debido a que los tallos de las plantas de pimiento son quebradizos a causa del peso, para ello se emplean tutores que tienen como función facilitar las labores del cultivo, proporcionando mayor firmeza a los tallos y aumentando la ventilación (Infoagro, 2012).

Entutorado horizontal o en seto. Esta práctica consiste en colocar postes de madera a lo largo de la cama donde se desarrolla el cultivo, presenta una distancia de 4 metros, unidos mediante rafia, colocada a diferente altura en forma horizontal, posteriormente las plantas van sujetas a ellos. La rafia colocada en forma horizontal, es apoyada por otra línea en forma vertical atada al emparrillado a una distancia de 1.5-2 metros, pasan a ser los que realmente mantienen la planta en posición vertical (Infoagro, 2012).

Entutorado vertical o tipo holandés. Este tipo de práctica obedece al diseño de la denominada poda holandesa, que consiste en dirigir las plantas a dos o tres guías, eliminando posteriormente alguna de las bifurcaciones en que se divide cada rama, cada tallo a medida que crece, se va enrollando al hilo (rafia) vertical que se cuelga del alambre sujeto a la estructura y fijado a la “cruz” de cada planta de tal manera que sirva como soporte para la planta. La forma de realizar este sistema de tutoreo y

poda están asociados a la obtención de una mejor calidad del fruto, esto resulta porque se consigue una mayor iluminación y aireación de la planta, pero las necesidades de mano de obra no han incentivado mucho su uso (Infoagro, 2012).

4.5 Fertilización

Una excesiva nutrición nitrogenada, que estimula el desarrollo vegetativo, si se aplica en un momento inoportuno, puede provocar el retardo o inhibir la formación de flores; el área foliar en exceso llega a reducir la productividad de una planta, esto ocurre porque aumenta el nivel de sustancia inhibidora que deprime el nivel de sustancia de naturaleza estimulante (Nuez-Viñals et al., 2003).

En el Cuadro 1 se exponen los requerimientos del cultivo de pimiento y la cantidad de fertilizante que se usó para la formulación de una solución nutritiva Steiner carente de hierro.

Cuadro 1. Cantidad de fertilizante que se usó en el bioensayo 1.

Requerimientos de los Macronutrientes					
Nutriente	Meq L⁻¹	Fertilizante	Presentación	gr L⁻¹	ml L⁻¹
NO ⁻³	12.0	Ácido nítrico	Líquido		0.59
H ₂ PO ⁻⁴	1.0	Ácido sulfúrico	Líquido		0.24
SO ⁻⁴	7.0	Ácido fosfórico	Líquido		0.10
Ca ⁺²	9.0	Fosfato monopotásico	Sólido	0.086	
K ⁺	7.0	Sulfato de potasio	Sólido	0.324	
Mg ⁺²	4.0	Nitrato de calcio	Sólido	0.152	
		Nitrato de potasio	Sólido	0.203	
Requerimientos de los Micronutrientes					
Fe	2.00 mg L ⁻¹	Quelato de hierro 6 %	Sólido		
Cu	0.02 mg L ⁻¹	Sulfato de cobre	Sólido	0.08 g m ⁻³	
Zn	0.09 mg L ⁻¹	Sulfato de zinc	Sólido	0.48 g m ⁻³	
Mn	0.70 mg L ⁻¹	Sulfato de manganeso	Sólido	1.90 g m ⁻³	
Mo	0.04 mg L ⁻¹	Molibdato de amonio	Sólido	0.09 g m ⁻³	
B	0.50 mg L ⁻¹	Ácido bórico	Sólido	2.52 g m ⁻³	

En el cuadro 2, se observan los requerimientos a un 75% de la solución nutritiva Steiner para el cultivo de chile ancho.

Cuadro 2. Cantidad de fertilizante que se usó en el bioensayo 2.

Requerimientos de los Macronutrientes					
Nutriente	Meq/L ⁻¹	Fertilizante	Presentación	g L ⁻¹	ml L ⁻¹
NO ⁻³	9.0	Ácido nítrico	Líquido		0.405
H ₂ PO ⁻⁴	0.75	Fosfato monoamónico	Sólido	0.086	
SO ⁻⁴	5.25	Sulfato de potasio	Sólido	0.324	
Ca ⁺²	6.75	Nitrato de calcio	Sólido	0.152	
K ⁺	5.25	Nitrato de potasio	Sólido	0.203	
Mg ⁺²	3.00				
Requerimientos de los Micronutrientes					
Fe	1.50 mg L ⁻¹	Quelato de hierro 6 %	Sólido	66.48 g 4m ⁻³	
Cu	0.015 mg L ⁻¹	Sulfato de cobre	Sólido	0.236 g 4m ⁻³	
Zn	0.067 mg L ⁻¹	Sulfato de zinc	Sólido	1.440 g 4m ⁻³	
Mn	0.525 mg L ⁻¹	Sulfato de manganeso	Sólido	5.720 g 4m ⁻³	
Mo	0.030 mg L ⁻¹	Molibdato de amonio	Sólido	0.280 g 4m ⁻³	
B	0.375 mg L ⁻¹	Ácido bórico	Sólido	5.280 g 4m ⁻³	

4.6 Plagas del cultivo *Capsicum annuum*

Pulgones (*Mizus persicae* S.). El pulgón se localiza en colonias atrás de las hojas y en los tallos, este patógeno causa daño en etapa ninfa y adulto, pasando a extraer los nutrientes de la planta, lo cual repercutirá en alterar el balance hormonal causando el enrollamiento de las hojas al detener su crecimiento, debido a que la savia es pobre en proteínas pero rica en azúcares. Los pulgones extraen grandes cantidades para conseguir suficientes proteínas excretando el exceso de azúcar en forma de “melaza”, donde se desarrolla el moho de hollín (fumagina) *Cladosporium* spp. Con el debilitamiento de la planta se facilita la introducción de sustancias tóxicas al transmitir patógenos, especialmente virus (Garza y Molina, 2008).

Barrenillo (*Anthonomus eugenii* C.). Es un patógeno que causa daño al inicio de la floración, el daño primario es causado por las larvas en frutos inmaduros; los primeros síntomas de un fruto infestado son pedúnculos amarillos y cenizos, los cuales llegan a marchitarse en el punto de unión con la planta, ocasionando la caída del fruto. Los adultos también ocasionan daño al picar los botones y frutos para usarlos como alimento (Garza et al., 2007).

4.6.1 Enfermedades del cultivo *Capsicum annuum*

Marchitez del chile (*Phytophthora capsici* L.). Este hongo habita en el suelo y se desarrolla rápidamente en condiciones de humedad alta y temperatura templada, atacando plántula y plantas adultas. Los síntomas que manifiestan las plantas son; una marchitez irreversible sin presentar un previo amarillamiento. Las raíces presentan moho y engrosamiento, aunado de chancro en la parte del cuello, siendo posible confundir los síntomas con asfixia radicular (PDH, 2010).

Mancha foliar (*Alternaria* spp.). Los síntomas que presentan son pequeñas lesiones circulares (0.5 mm de diámetro) de apariencia acuosa tornándose a café oscuro, rodeadas de un halo verde o amarillento. En las lesiones se alcanza a observar anillos concéntricos oscuros. Esta enfermedad provoca una defoliación severa, quedando los frutos expuestos al sol, causando reducción en la calidad y cantidad de fruto. La forma de reproducción de las esporas de esta enfermedad se da a partir del viento, ropa, herramientas y el agua. Las esporas rápidamente pierden viabilidad en el suelo (Chew-Madinaveitia et al., 2008). Esta enfermedad se hace presente cuando hay una alta humedad relativa y existe la presencia de agua libre sobre las hojas y temperatura que va de 12-30 °C.

Cenicilla (*Leveillula taurica* o *Odiopsis taurica*). Los síntomas se presentan en las hojas inferiores, donde el hongo produce pequeñas manchas de color blanco con apariencia polvosa compuestas por esporas que emergen de las estructuras del hongo. Las hojas infectadas se tornan cloróticas, después café o gris claro provocando su muerte. La infección empieza principalmente en los folíolos de la planta, se manifiesta en el haz con decoloraciones circulares amarillas, que debido a su necrosis posterior adquieren un color pardusco. Cuando las lesiones son numerosas, éstas pueden producir un amarillamiento total de la hoja. En el envés, se desarrolla un punteado necrótico, muchas veces cubierto de moho blanco. La enfermedad progresa de las hojas viejas a las jóvenes, provocando la defoliación de las plantas infectadas, por tanto los frutos pueden presentar golpe de sol (ITGA, 2011). La falta de follaje impide el desarrollo normal de la planta e incrementa el

daño por exposición al sol en los frutos. El borde de las hojas se enrolla hacia arriba pasando a quedar expuestas las fructificaciones del hongo en el envés de las hojas (Chew-Madinaveitia et al., 2008)

4.6.2 Virosis en cultivo de *Capsicum annuum*

Virus del mosaico del pepino (CMV). Perteneciente a la familia de los cucumovirus, pasando a ser hospedante en más de 40 familias de plantas a nivel mundial, su mayor característica, provoca achaparramiento de la planta, follaje clorótico, con malformación de las hojas y frutos. La transmisión se da a partir de un vector o por el contacto entre hojas (Chew-Madinaveitia et al., 2008).

Virus Y de la Papa (PVY). Perteneciente a la familia de los potyvirus, este virus es un patógeno obligado debido a que infecta exclusivamente la familia de las solanáceas, la sintomatología que presenta es un mosaico ligero en las hojas jóvenes, manchas intervenales, ligera rugosidad de la lámina foliar y bandas verdes perinervales y amarillamiento foliar. La altura de la planta se verá afectada según sea la etapa de infestación, repercutiendo también en la malformación de frutos de coloración irregular, la forma de transmisión se da por daño mecánico siendo poco probable que se transmita a partir de la semilla (Chew-Madinaveitia et al., 2008).

Virus del Mosaico de la Alfalfa (AMV). Patógeno perteneciente a la familia de Bromoviridae, los síntomas que muestra es un mosaico ligero, donde las plantas infestadas se ven afectadas en su crecimiento, malformación de hojas apicales, y mosaicos acentuados, apareciendo una necrosis. Los frutos presentan necrosis que provoca una maduración irregular, la forma de transmisión es a través de un vector otra forma de reproducirse es a partir de la semilla (Chew-Madinaveitia et al., 2008).

Virus del Mosaico del Tabaco (TMV). Perteneciente al género Tobamovirus, los síntomas se muestran en las hojas jóvenes, donde algunas de las hojas presentan abultamientos, corta estatura por parte de la planta, plantas cloróticas. Provocando defoliación de las hojas adultas, aborto de flor y fruto, el fruto que queda presenta

deformación, tamaño pequeño y de maduración irregular, acompañado de necrosis en las yemas. La infestación se da por daño mecánico, a través de herramientas o por residuos de plantas infestadas (Chew-Madinaveitia et al., 2008).

Virus del Jaspeado del Tabaco (TEV). Patógeno obligado perteneciente al grupo de los potyvirus que solo infesta a especies de la familia de las solanáceas, los síntomas provocan que las raíces adquieran una coloración negra pasando a marchitar la planta, con poco crecimiento y tornando a una forma arbustiva, en las hojas se observa un mosaico ligero con una coloración oscura en las venas, su infestación se basa en un vector (Chew-Madinaveitia et al., 2008).

4.7 Sustratos agrícolas

En horticultura se aplica el término sustrato a todo aquel material sólido distinto del suelo *in situ* natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, colocado en un contenedor en forma pura o mezcla, permitiendo el anclaje del sistema radicular, desempeñando un papel de soporte para la planta. Las funciones más importantes de un sustrato de cultivo son proporcionar un medio ambiente “ideal” para el crecimiento de las raíces y constituir una base adecuada para el anclaje o soporte mecánico de la planta.

El sustrato puede intervenir o no en el proceso de la nutrición mineral de la planta. Entre los diferentes criterios de clasificación de los sustratos, merece ser destacado el que se basa en las propiedades de los materiales:

- a) Químicamente inertes: arena granítica o silícea, grava, perlita, lana de roca.
- b) Químicamente activos: turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales lignocelulósicos.

También se debe contemplar que un sustrato de cultivo está formado por tres fases:

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

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

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

En síntesis, el concepto de sustrato involucra materiales sólidos o mezclas de materiales, de origen natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, utilizado para producir plantas o cultivos en contenedores (Volke et al., 2010).

4.7.1 Clasificación de los sustratos

Urrestarazu (2004), describe a los sustratos en base a las características que estos aportan a las plantas; de tal manera que se han podido agrupar en las siguientes seis clasificaciones, sin embargo, aún es factible utilizar muchos otros materiales como sustrato para la producción hidropónica de cultivos agrícolas.

Arena. Es un material de naturaleza silíceo (SiO_2) y de composición variable, que depende de los componentes de la roca silicatada original. Las propiedades físicas varían en función del tamaño de las partículas. La densidad aparente de las arenas es superior a 1.50 g cm^{-3} , siendo el espacio poroso total inferior al 50%. Las arenas finas, con tamaño de partículas inferior a 0.5 mm, presentan una buena capacidad de retención de agua, pero están pobremente aireadas especialmente cuando la altura del sustrato en el contenedor es pequeña. Su pH puede variar entre 4-8. Son inertes desde el punto de vista químico, siempre y cuando estén exentas de limos, arcillas, carbonato cálcico. Su capacidad de intercambio catiónico es nula o muy baja (inferior a $5 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$). La arena es un sustrato fuerte, consecuentemente una de sus funciones es aumentar la densidad aparente de las mezclas. En adición, el uso de arenas con tamaño de partículas adecuado aumenta la humedad de la mezcla.

Corteza de pino. Sustrato que incluye la corteza interna (floema vivo) y a la corteza externa (ritidoma) de los árboles, incluyendo, a su vez, a las células suberosas (felema). Las propiedades físicas de la corteza dependen estrechamente del tamaño de sus partículas, recomendándose que del 20-40% de dichas partículas presenten

un tamaño inferior a 0.8 mm. Se trata de un sustrato ligero, ya que su densidad aparente varía entre 0.10 g cm^{-3} , (partículas gruesas) y 0.45 g cm^{-3} (partículas finas). La porosidad total supera el 80-85% (v), siendo bien conocido que las cortezas presentan una porosidad interna y abierta. La capacidad de retención de agua fácilmente disponible es baja a media, según el tamaño de las partículas, siendo la capacidad de aireación elevada, el pH varía de medianamente ácido (cortezas frescas) a neutro (cortezas compostadas) y su nivel de fertilidad es superior al de las turbas, especialmente para fósforo, potasio y calcio. La capacidad de intercambio catiónico se sitúa alrededor de los $55 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$.

Lana de roca. Se trata de un producto mineral transformado industrialmente por temperaturas elevadas. Básicamente es un silicato de aluminio, que también contiene proporciones de calcio, magnesio, en menor proporción hierro y manganeso. La lana de roca es un material que presenta una baja densidad aparente 0.08 g cm^{-3} , porosidad total elevada (> 96%), alta capacidad de retención de agua fácilmente disponible (54%) y elevada capacidad de aireación (> 35%). Su capacidad de retención de agua depende estrechamente del espesor y la forma de tabla o plancha. Esta última tiende a formar un gradiente de agua creciente por lo que el contenido de aire es menor en la base, siendo conveniente tener esto en cuenta a la hora del manejo de riego y en la disposición del sistema para la evaluación del agua sobrante por drenaje.

Perlita. Es básicamente un silicato aluminico de origen volcánico. La perlita procede de rocas volcánicas vítreas (grupo de las riolitas), que se han formado por enfriamiento rápido, constituyendo un material amorfo, que contiene un 2-5% de agua combinada. El material recién sacado se muele y es transformado industrialmente mediante un tratamiento térmico con precalentado a $300\text{-}400^\circ\text{C}$ y depositado en hornos a 1000°C . A estas temperaturas se evapora el agua contenida en sus partículas, obteniendo un material muy ligero con una alta porosidad, obteniendo un material de 128 Kg m^{-3} de densidad.

Turbas. Fundamentalmente son vegetales fosilizados, la turba es considerada como la forma disgregada de la vegetación de un pantano, descompuesta de modo

incompleto a causa del exceso de agua y la falta de oxígeno, que se va depositando con el transcurso del tiempo, lo que favorece la formación de estratos más o menos densos de materia orgánica, en el que se puede identificar los restos de diferentes especies vegetales. Las propiedades que presentan las turbas se mencionan a continuación; la densidad aparente varía entre 0.06 y 0.10 g cm⁻³, para las turbas rubias, y 0.10 g cm⁻³ para las negras.

El espacio poroso total oscila entre el 95% (v) o más, en el caso de las turbas rubias, hasta menos del 80% (v), para las turbas negras muy descompuestas. El pH puede oscilar entre 3.5 (turba ácida) hasta 8.5 (turba eutrófica). Las turbas presentan una capacidad de intercambio catiónico elevada, propiedad que está estrechamente relacionada con su grado de humificación. Este material orgánico presenta un nivel bajo de fertilidad, estimado por el número de nutrientes asimilables.

Vermiculita. La vermiculita natural es un silicato hidratado de magnesio, aluminio y hierro. Si bien el comportamiento hídrico de la vermiculita es en cierto modo parecido al de la perlita con tamaño de partículas similar, las propiedades químicas y el comportamiento mecánico de aquella son, por el contrario, bien diferentes. Este sustrato expone una densidad aparente que va de los 0.005-0.192 g cm⁻³, esto dependiendo del tamaño de la partícula, es considerado como un material muy poroso adquiriendo un 95% de porosidad del total de su volumen, su disposición para retener el agua es baja y presenta un pH neutro. Su capacidad de intercambio catiónico es buena oscila entre los 90-150 meq 100 g⁻¹.

Por lo tanto es bien sabido que la vermiculita pasa a ser un material con una elevada capacidad tampón, además de considerarse como un sustrato muy activo desde el punto de sus propiedades físico-químico, tendiendo a degradarse físicamente (fragmentación y exfoliación) y/o químicamente por igual (contracción de láminas después de la absorción tanto de amonio como de potasio) consecuentemente se colapsa y disminuye la capacidad de aireación, por lo que el medio se vuelve compacto y de corta duración.

4.8 Situación en el uso de fertilizantes

La agricultura denominada intensiva es aquella que utiliza insumos para generar buenos rendimientos, estos insumos son los fertilizantes químicos, manifiestan aumentos en la productividad agrícola en los primeros años que se usan, pero también se sabe que la productividad no se sostiene por mucho tiempo. La eficiencia del uso de los fertilizantes es mayor cuando más se haga coincidir su disponibilidad con las necesidades de nutrientes por la planta. El uso desmedido de los fertilizantes, traducido como suministro excesivo de elementos químicos a los suelos de cultivos, ha sido señalado a través del tiempo, como contaminante de las áreas de producción agrícola del mundo. Los productores regularmente aplican grandes cantidades de fertilizante nitrogenado para obtener altos rendimientos de productos de buena calidad. Es conocido que los fertilizantes químicos, ayudan en la nutrición vegetal desde la germinación de la semilla y durante todo el ciclo del cultivo; sin embargo, la mayoría de estos productos son derivados de recursos naturales no renovables y actualmente su costo es elevado (SAGARPA-COFUPRO, 2015).

Los fertilizantes químicos presentan la desventaja de no disolverse adecuadamente, lo que representa pérdidas para el productor y contaminación del ambiente. Por lo general los nutrientes liberados por los fertilizantes pueden descomponerse antes de que las plantas los puedan absorber (Aumtong, 2009). Los suelos de invernaderos están sufriendo un proceso de degradación en sus características físico-químicas y en la acumulación de metales pesados (Ramos-Miros, 2002). El uso poco controlado de los fertilizantes puede provocar la salinización del suelo y la contaminación del agua por iones nitrogenados y fosfatados.

La aplicación de los fertilizantes químicos comúnmente se ha realizado sin un conocimiento previo del estatus actual del suelo, lo cual ha resultado en una pobre respuesta de los cultivos a la aplicación de estos productos, al dispendio económico y al aumento del deterioro de los recursos ambientales (Aguado-Santacruz, 2015).

El evidente uso en exceso de los fertilizantes nitrogenados ha acarreado una serie de repercusiones en los cultivos y el medio donde se aplican, provocando una reducción en el contenido de carbohidratos en las plantas, acidifican el suelo e incrementan la incidencia de maleza y enfermedades. El uso de estos productos y la práctica del monocultivo han sido consideradas como el origen de la alteración de la microfauna del suelo (Sarathndraa et al., 2001), además de conllevar a la pérdida de la biodiversidad y la alteración de los ciclos biológicos ocasionados por la interferencia en el flujo natural de los nutrientes (Mozumdera y Berrensb, 2007).

4.8.1 Reducción de las pérdidas de fertilizantes nitrogenados

Los perjuicios a largo plazo asociados con el uso de químicos agrícolas (agotamiento de recursos naturales y daños ambientales) requieren el desarrollo y/o la implementación de tecnologías limpias, que lleguen a causar un impacto mínimo en el ambiente, principalmente diseñadas para conservar y mantener la productividad de los suelos agrícolas de tal manera que se obtengan cosechas con un mayor valor agregado al estar libres de químicos dañinos al hombre (Aguado-Santacruz, 2015).

De esta manera los fertilizantes se han convertido en una tecnología que puede proporcionar grandes beneficios cuando se utilizan de manera razonada, pero que al mismo tiempo pueden causar severos daños al medio ambiente y pérdidas económicas cuando se usa de forma discriminada. Por lo tanto, el sector agroproductivo del país hoy en día afronta el reto de llevar a cabo la reducción del impacto ambiental negativo generado por el uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados; además los productores se enfrentan a pérdidas de más de 50% de este tipo de fertilizantes aplicados al campo; ya sea por volatilización, escorrentía o lixiviación del producto (González et al., 2007).

La degradación de los suelos agrícolas es un proceso inevitable, dándose de manera natural o inducida por la actividad humana, y constituye en la reducción o destrucción de las características biológicas de los recursos naturales, causada por el uso inadecuado de los mismos. Entre los factores antropogénicos que favorecen la

degradación de la tierra está la sobre explotación de los recursos, la expansión demográfica, la expansión de las actividades agrícolas y ganaderas, que a su vez implica un uso indiscriminado de las sales fertilizantes (Gorki et al, 2009). Para reducir el impacto negativo a los suelos por el uso excesivo de fertilización se deben utilizar técnicas que sean amigables con el ambiente. Es por eso que se propone la fertilización ecológica para resolver los problemas causados por la fertilización actual en sistemas de agricultura intensiva.

4.8.2 Zeolitas naturales como sustratos agrícolas

La zeolita es un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, caracterizados por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, intercambian cationes como Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+1} y NH^{+4} , así como diversos compuestos fosfatados, amonio y componentes de la materia orgánica, posee una estructura tridimensional rígida (similar a un panal de abejas) conformado por una red de túneles interconectados creando una amplia área superficial para realizar el intercambio catiónico y la absorción de humedad. Esta última puede entrar y salir de la armazón tridimensional sin variar la estructura (SAGARPA-INIFAP, 2013).

La zeolita es un mineral natural de origen volcánico con composición química semejante a la arena, pero con diferente estructura cristalina. Está formada por silicio en forma de silicato combinado con átomos de oxígeno y aluminio en una estructura cristalina tridimensional rígida, que deja pequeñas cavidades interconectadas llamadas microporos, comportándose como una esponja, capaz de retener agua y nutrientes con carga positiva (cationes), como el nitrógeno amoniacal, potasio, calcio y magnesio que puede ir liberando a las plantas de manera lenta y gradual (SAGARPA-INIFAP, 2013).

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos que presentan una estructura tridimensional (Ramesh y Reddy, 2011), a las cuales se les atribuyen numerosas propiedades como su capacidad para perder y ganar agua reversiblemente y ser

capaces de intercambiar variedad de cationes sin presentar cambios mayores en su estructura básica (Collazos-García, 2010). Las zeolitas más usadas en la agricultura son la clinoptilolita y la modernita, que al entrar en su estructura interna y externa, funcionando entonces como un fertilizante nitrogenado de liberación lenta (Flores et al., 2007) promovida por la capacidad de mantener un activo intercambio de cationes que son suministrados a raíz de las aportaciones de fertilizantes incorporándolos a su masa porosa y al mismo tiempo funcionando como medio de almacenamiento reteniendo humedad y cationes para que la planta disponga de ellos cuando así lo demande.

4.8.3 Zeolitas; una alternativa para reducir las pérdidas de fertilización

Para reducir el impacto negativo de los suelos por el uso excesivo de fertilización se deben de utilizar técnicas que sean amigables con el ambiente. Proponiéndose la fertilización ecológica para resolver los problemas causados por la fertilización actual en sistemas de agricultura intensiva. El desarrollo de técnicas de fertilización con nitrógeno para aumentar la eficiencia en aprovechamiento de este nutriente para los cultivos podría llegar a manifestar una reducción en los costos de insumos y el impacto ambiental por las pérdidas de N (Quemada, 2008; Barbieri et al., 2008).

Una de las técnicas es el uso de la zeolita mezclada con los fertilizantes (Ahmed et al., 2009). La zeolita resulta como un mejorador de la eficiencia de aprovechamiento de los fertilizantes inorgánicos, principalmente de los fertilizantes nitrogenados, desempeñándose también como mejorador y acondicionador del suelo (SAGARPA-INIFAP, 2013).

Las zeolitas se presentan como potenciadores, ya que por las condiciones naturales, este mineral se presenta como una posible solución a la problemática ambiental y como un subsanador en los costos de producción, debido a que las zeolitas mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, es uno de los caminos más efectivos para incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la

zona de las raíces y disminuir las aplicaciones de fertilizantes reduciendo las pérdidas por volatilización y lixiviación de los mismos (Osorio et al., 2003). Constituyendo a mejorar la humedad de la capa arable disminuye la densidad aparente del suelo lo que al disminuir la densidad aparente aumenta la capilaridad no la fluidez del agua, lográndose un incremento de producción en la cosecha de los cultivos, y sobre todo, reduciendo el impacto ecológico.

Muñoz (2003), señala que la aplicación de zeolita disminuye los problemas del exceso de fertilización química, porque reduce las cantidades y la frecuencia de aplicaciones por ser el único mineral (de origen volcánico) capaz de retener los macro y micro nutrientes esenciales para los cultivos, evitando su pérdida en las capas inferiores del suelo, haciendo posible que las plantas lo absorban a través de sus raíces. Sirve para evitar la pérdida de agua ya que retiene hasta un 30% de su peso; en consecuencia, ayudara a la planta a que resista eventualmente carencias. Cuando el vegetal requiere de nutrientes y agua, la zeolita lo sede únicamente en el momento que los necesita.

4.8.4 Características generales de la zeolita

Las características más destacadas de los materiales zeolíticos según Haro, 2011; y Bekkum et al., 1991, son las siguientes:

- ◆ Mejora las características físicas, químicas y biológicas del suelo, gracias a un efecto de agregación de sus partículas y al aporte de micronutrientes naturales.
- ◆ Incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- ◆ Aumenta la retención de fertilizantes y humedad del suelo, lo que permite reducir los volúmenes de dichos materiales y el estrés del cultivo en la época seca.
- ◆ Incrementa los niveles en el suelo de fósforo, calcio, potasio, y magnesio entre otros, más allá de lo que él mismo porta, evitando problemas de fijación

y optimizando las concentraciones de los mismos en el suelo y en los fertilizantes adicionados al suelo.

- ◆ Tiene un efecto centralizador del pH, reduce la acidez del suelo y los excesos de fierro y aluminio.
- ◆ Aumenta la tolerancia natural de las plantas a plagas y enfermedades, al permitir una nutrición completa y equilibrada, que mantiene al cultivo en estado de proteosíntesis.
- ◆ Su efecto de liberación lenta y continua, hace que el producto trabaje por un largo periodo de tiempo, sin pérdidas por lavado y con un aprovechamiento de hasta un 96%.
- ◆ Incrementa el contenido nutritivo de los alimentos, tanto de origen animal como vegetal.
- ◆ Gran capacidad de absorción dependiendo del tamaño de las aberturas de poros y el volumen de hueco.
- ◆ Presenta una diversidad de formas.
- ◆ Su actividad catalítica que le permite funcionar como portador de materiales nanocompuestos y a nivel micrométrico que se pueden liberar gradualmente.
- ◆ Alto grado de hidratación.

4.8.5 Propiedades de las zeolitas

La zeolita comúnmente llamada “la roca mágica” es un mejorador de los suelos, actuando sobre sus características físico-mecánicas, químicas y biológicas, es decir, sobre su estructura y textura, evitando que el suelo se compacte y pueda tener oxígeno para el desarrollo de las raíces y microorganismos, aumentando el drenaje, favoreciendo al productor agrícola con la disminución considerablemente de los costos de producción y aumentando el rendimiento del cultivo. Según se expresa en el manual técnico para organológicos, huertos Intensivos y organoponía semiprotegida (2007); la zeolita es un mineral no metálico activo que puede retener muchos nutrientes. Presenta una reacción alcalina y gran cantidad de calcio, potasio y otros elementos. Además de las propiedades químicas mencionadas, favorece el

mantenimiento de las propiedades físicas, como abundante aireación y capacidad de retención de agua.

La zeolita tiene dos propiedades donde se fundamenta su uso en la producción de cultivos; 1) presenta una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) que va 200-300 $\text{cmol}^+ \text{Kg}^{-1}$ a consecuencia del remplazo de Al^{+3} y Si^{+4} durante el proceso de formación; 2) expone canales internos dentro de su estructura tridimensional que les permite adquirir la alta capacidad de retención de agua e intercambio de cationes brindados por los fertilizantes (Soldat, 2003). La zeolita se ha utilizado en la agricultura como un mejorador de suelo o aditivo de fertilizante y fertilizante de liberación lenta, lo anterior ocurre por la eficiencia que presentan estos sólidos cristalinos micro-porosos (Jakkula, 2005).

También se conoce que las zeolitas son minerales no tóxicos (sin efecto adverso para la salud ni para el ambiente), esta capacidad adquirida es importante, debido a que son utilizadas bajo la aplicación de productos usados en la agricultura, estos productos principalmente repercuten en mantener un efecto residual tóxico para la salud, mismo que no se presenta con el uso de zeolita. Con esta característica, la mezcla de zeolita con los fertilizantes nitrogenados, es una alternativa de solución, porque lograr una concentración nutrimental suficientemente elevada y balanceada, con una liberación lenta de nutrimentos que prolongara su efecto residual y permite a la planta absorberlo a un ritmo más acorde con su requerimiento fisiológico (Flores et al., 2007; Millán et al., 2008).

4.8.6 Usos de la zeolita en la agricultura

Expresan propiedades de intercambio iónico, la zeolita puede ser utilizada en la agricultura por su gran porosidad y alta capacidad de intercambio de cationes. Las zeolitas son utilizadas como portadoras de nutrientes y como un medio para atraparlos y liberarlos lentamente (Ramesh et al., 2011). Su alta capacidad de intercambiar cationes permite absorber el nitrógeno, la humedad y los

micronutrientes. Administra los nutrientes para la planta a medida que los requiere, disminuyendo así el uso de fertilizante y el uso de agua hasta en un 36%.

El interés creciente en los últimos años a favor de la utilización de aluminosilicatos naturales en la agricultura es por la estructura y propiedades que presentan, capaces de liberar lentamente cationes y diversos tipos de productos agroquímicos, tales como; insecticidas, pesticidas, agentes antibacterianos, estimuladores de crecimiento y mejoradores de fertilidad (SAGARPA-INIFAP, 2013). Desde el punto de vista ecológico también han sido usadas para remover el daño de la contaminación del suelo, esto se debe a la absorción de metales pesados y otros compuestos tóxicos para las plantas en la agricultura intensiva.

Los efectos de la zeolita se muestran en el crecimiento de las plantas, a causa de su alto intercambio iónico y la capacidad de retención, las zeolitas naturales (en particular Clinoptilolita) como también, su gran afinidad de absorción de agua han contribuido a sus aplicaciones exitosas de crecimiento de las plantas. Otro de los usos que se le ha encontrado a las zeolitas naturales es la aplicación como mejorador en diferentes suelos, al voleo o de forma localizada, en el fondo del surco a ambos lados de la semilla y a una profundidad de 10 cm, provocando un incremento de la CIC y mayores contenidos en los suelos de fósforo y potasio (Febles et al., 2014).

4.8.7 Zeolita como sustrato hidropónico

La zeolita podría ser una de las opciones para ser utilizada como sustrato en la producción de cultivos hortícolas, siendo un material inerte de origen sedimentario, perteneciente al grupo de los aluminosilicatos y recientemente incorporado como sustrato. Las características físicas y químicas de la zeolita la convierten en sustrato atractivo para cultivos hidropónicos. Se resalta que las plántulas establecidas en zeolita tienen mejor crecimiento a diferencia de otros sustratos como el tezontle de granulometría gruesa (Urbina et al., 2006). La zeolita se puede utilizar para la optimización del medio ambiente en cultivos sin suelo mediante la promoción de la

eficiente absorción de nutrientes, en consecuencia reduce la contaminación del medio ambiente (Gül et al., 2005).

Las zeolitas son acaparadoras de cationes, dentro de los cationes absorbidos se encuentra: Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} , a excepción del Na^+ los demás, podrían ser aprovechados por las plantas cuando se emplean como sustrato en cultivos hidropónicos (Stamatakis et al., 2001).

4.9 Nanotecnología (NT)

El termino nanotecnología se aplica exclusivamente para definir a la ciencia y técnicas que se aplican a nivel de nanoescala, siendo medidas extremadamente pequeñas o “nanos”. Por lo tanto, la nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control, explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala.

La nanotecnología se ha definido como la manipulación de la materia a la escala de moléculas y átomos (en millonésimas de metro), el interés de esta nueva tecnología se debe a que la materia se muestra a nivel de nanoescala, propiedades totalmente distintas a las que presenta en su dimensión macro (Delgado, 2007), ocasionado por el incremento en la relación superficie/volumen (Samrat et al., 2001). Para tener una idea de las dimensiones a las que se hace referencia en nanotecnología se debe considerar que, una esfera con un diámetro de 20 nm es mucho más grande que un átomo, una molécula, el ADN o una proteína, sin embargo esa misma esfera es mucho más pequeña que un virus promedio, una bacteria o que el núcleo de una célula humana (Hullmann 2006; Frejo et al., 2011).

La nanotecnología en concordancia con las propiedades relacionadas a los nanomateriales, tienden a tener grandes potenciales en la rama en que son aplicadas, algunas suelen ser aplicaciones agro-biotecnológicas en pesticidas y

fertilizantes que provocan la contaminación del ambiente, la aparición de plagas y patógenos en la agricultura, además de contemplar la pérdida de la biodiversidad.

4.9.1 Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología (NT), es una de las más recientes innovaciones científicas, siendo la de mayor alcance en lo referente a la alta tecnología para la agricultura y los alimentos en frescos. El uso de nuevas tecnologías está adquiriendo cada vez más protagonismo en la vida diaria, un ejemplo de ello es la agricultura se está beneficiando de las aplicaciones nano-tecnológicas, las cuales con técnicas experimentales permiten fabricar, caracterizar y manipular partículas de tamaño minúsculo llamadas nanopartículas (NPs), que ofrecen múltiples beneficios para los cultivos (Quispe, 2010).

En la actualidad los productores agrícolas a nivel mundial son demandantes en cuestión de productos que pasen a resolver los problemas de producción, alguna de estas peticiones son; la poca eficiencia en el rendimiento del producto final, la poca eficacia en el uso de fertilizantes, la pérdida de fertilidad en los suelos por el uso inadecuado de productos sintéticos, cambio climático, agregándose la disminución de la superficie agrícola y la constante demanda de alimento por el aumento de la población. Ante esta situación, la única manera de hacerle frente a esta diversidad de problemas, se torna a explorar una nueva tecnología de vanguardia como la nanotecnología (Quispe, 2010).

Recientemente los trabajos realizados sobre nanotecnología orientados hacia la agricultura pasan a perfilarse como una novedosa investigación en donde se pretende adoptar una nueva forma de manipular los cultivos desde una perspectiva sustentable. El reto que se tiene con el uso de la nanotecnología aplicada en la agricultura, es llevar a cabo la innovación en el desarrollo de nuevos productos aplicados al sector agrícola, haciendo énfasis en la sustentabilidad puesto que esta nueva ciencia crea una excelente oportunidad para reducir el uso de agroquímicos

sintéticos, provocando una disminución en los efectos que ha venido ocasionando el impacto ambiental en las últimas décadas.

La aplicación de la NT en el sector agrícola crea la posibilidad de incrementar la producción de los alimentos, la generación de nanofertilizantes como promotores de crecimiento en las plantas. Es por eso que la NT en la agricultura aparenta ser muy beneficiosa para la humanidad, ya que ayuda a la germinación de los cultivos más rápidamente, a tener cultivos libres de plagas, los cultivos absorban de mejor manera los nutrientes que proporciona la tierra y muchas otras ventajas más que en el pasado sin poseer la nanotecnología se les hubiera hecho imposible tener este tipo de cultivos. Las aplicaciones de la NT en la agricultura son diversas, destacando principalmente la elaboración de pesticidas y fertilizantes encapsulados para su liberación controlada; estabilización de biopesticidas y la liberación lenta de agroproductos como fertilizantes y otros.

4.9.2. Importancia de las nanopartículas

La importancia de la nanotecnología radica en las propiedades químicas y físicas de la materia a nivel nanométrico, diferenciándose de las propiedades de la materia a escalas mayores. Las NPs pueden tener una mayor reactividad química y ser más bioactivas que las partículas más grandes, por su tamaño, tienen mejor acceso a cualquier cuerpo y tienen probabilidad de entrar en células, tejidos y órganos. Por lo tanto, las aplicaciones de la NT en la agricultura, tienen relación con mejoras en plaguicidas, herbicidas, fertilizantes, mejoradores o acondicionadores de suelos, así como nanosensores para la detección de niveles de microorganismos patógenos, agua, nitrógeno y agroquímicos.

En referencia a la importancia de la aplicación de la NT en la producción agrícola, se conoce la mejora de la productividad (principalmente en el uso de fertilizantes), optimizando la eficiencia en el uso del agua, el consumo de fertilizantes y una mejor eficiencia en la aplicación de productos fitosanitarios y/o protección, sin embargo la mayoría de las investigaciones están en curso (Perlatti et al., 2012).

Es por eso que las NPs tienden a ser productos potenciales que podrían ser una innovación importante para la agricultura moderna; en gran medida se debe al tamaño de las nanopartículas y/o nanomateriales que los componen permitiéndoles la interacción mejorada y una absorción eficiente de los nutrientes a través de las hojas y raíz para la nutrición de los cultivos. El uso de las NPs en la agricultura se debe a las propiedades que éstas llegan a manifestar como la actividad antimicrobial que presentan. Un ejemplo de ello se presenta en las NPs de óxido de zinc que tiene una fuerte actividad antifúngica y antibacterial, por su parte las NPs de plata son utilizadas como agentes antimicrobianos.

4.9.3 Aplicación de las nanopartículas en la agricultura

En este sentido dentro de las NPs metálicas se encuentran las de Zn, Fe, Cu, Ag, Ti, Au, Mn), teniendo muchas de ellas gran potencial en la agricultura debido a que pueden ser utilizadas como nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015; Naderi y Danesh-Shahraki, 2013), nanoherbicidas (Yadav y Srivastava, 2015), nanopesticidas (Dubey y Mailapalli, 2016) y nanosensores (Servin et al., 2015).

Las NPs son un producto que se deriva de la nanotecnología, considerada como una tecnología que ofrece una liberación controlada de productos, tal es el caso de fertilizantes, herbicidas, insecticidas, fungicidas, dentro de los beneficios que proporcionan también se observa que induce resistencia a las plantas para combatir enfermedades a través de algunas moléculas. La eficiencia de absorción de estos productos y los efectos de las nanopartículas sobre las variadas funciones de crecimiento y procesos metabólicos varían de manera diferenciada entre las plantas, es decir la aplicación de nanopartículas en la patología de las plantas se dirige a los problemas agrícolas específicos en la interacción planta-patógeno proporcionando una nueva forma de protección a los cultivos (Nair et al., 2010).

4.9.4 Clasificación de los nanomateriales en la agricultura

Nanominerales. La zeolita es un aluminosilicato hidratado cristalino (arcilla) con estructuras tridimensionales, caracterizadas por la habilidad de retener y liberar agua e intercambiar iones sin modificar su estructura atómica, intercambian cationes como Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+1} y NH^{+4} . Los materiales de zeolita permiten una introducción de nuevos grupos funcionales a través de varios procesos de modificación, mejorando sustancialmente su actividad y selectividad en la eliminación de varias sustancias (Inglezakis et al., 2002).

Nanopartículas metálicas. Las NPs metálicas son materiales cuya naturaleza química está definida principalmente por la presencia de un metal. En sentido estricto este tipo de materiales no son en un 100% de naturaleza metálica, con frecuencia se requiere el uso de agentes de estabilización o bien para otorgarle alguna propiedad en particular, la superficie del metal suele funcionalizarse con alguna sustancia de naturaleza orgánica (Ju-Nam y Lead, 2008).

Las NPs metálicas poseen propiedades con aplicaciones en diversas áreas tecnológicas y desde la antigüedad se tiene conocimiento de éstas, aun cuando se tenían antecedentes de la utilización de las NPs metálicas, en 1857 Faraday realizó el primer estudio sistemático, presentando un estudio de la síntesis y propiedades de coloides de oro (Gutiérrez, 2005) introduciendo en el área de la nanotecnología las nanopartículas metálicas, teniendo en la última década éxito, gracias a las propiedades que muestran como magnéticas, eléctricas y catalíticas (Roldán et al., 2000) las propiedades pueden cambiar de manera impredecible y tienden a interactuar de diferente manera ya sea libres o agrupadas esto debido a las fuerzas de interacción atractiva o repulsiva que expresen (IRSLL, 2011).

Nanosensores. Es otra de las aportaciones que implementa la nanotecnología, siendo prometedora la aplicación de los nanosensores en el campo de la agricultura. Los Nanosensores proporcionan información en tiempo real acerca de la detección o localización de patógenos de tal manera que el monitoreo lo realizan en tiempo real

apoyándose como un estímulo para obtener buenas producciones (Chen y Yada, 2011). Esta información sería usada como medio de predicción para la protección de los cultivos sobre patógenos, parásitos, virus, malezas y como resultado se adquiere una mejora en la producción.

Esta estrategia permitiría la detección oportuna de residuos de plaguicidas, o enfermedades, de tal manera que sirva para identificar de forma localizada las necesidades de nutrientes y agua de cada cultivo. Se pronostica que los métodos de detección contribuyan a incrementar la productividad y disminuir el uso de agroquímicos debido a una intervención temprana.

4.9.5 Nanopartículas usadas en la agricultura

Nanopartículas de zinc. Las NPsZnO en el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobial, potencial como nanofertilizantes y promotores de crecimiento. Su efecto atribuido por el zinc siendo un micronutriente esencial para el crecimiento de plantas. Los efectos de las NPsZnO aplicadas en plantas muestran un efecto en el crecimiento, se menciona que este efecto puede ser relacionado con la actividad que tiene el zinc como precursor directo en la producción de auxinas que regulan el crecimiento, además de causar respuesta en elongación y división celular de la planta (Rehman, et al., 2012). El zinc es uno de los nutrientes esenciales y un componente de gran importancia en varias enzimas que son responsables de variadas reacciones metabólicas (Shyla y Natarajan, 2014), otra función en las cuales participa el zinc es en la elaboración de clorofila; germinación de semillas, producción de polen y biomasa (Pandey, et al., 2010).

Nanopartículas de titanio. Las nanopartículas de titanio presentan excelentes propiedades, las cuales se pueden explotar en el campo de la agricultura, una de las características que presentan es que logra aumentar la absorción de nutrientes aprovechables por la semilla, mejorando la velocidad de germinación.

Nanopartículas de cobre. El cobre tiene importancia biológica en el proceso de fotosíntesis de las plantas, aunque no forma parte de la composición de la clorofila. El cobre ha tenido un gran interés por presentar un amplio espectro contra bacterias y hongos, donde la eficiencia de este elemento depende de las condiciones del medio ambiente, la concentración de iones y el tipo de microorganismo a combatir. Dada la efectividad del cobre contra organismos patógenos asociados con enfermedades de plantas, ha sido utilizado ampliamente en el sector agropecuario en forma de pesticida desde ya hace bastante tiempo y hoy en día como promotor de crecimiento vegetal (Jaiswal et al., 2012).

Nanopartículas de plata. Las nanopartículas de plata son una de las aportaciones en la nanotecnología más estudiadas, por sus propiedades antimicrobianas. Las propiedades que presentan las nanopartículas de plata permitirían la liberación lenta y controlada de los cationes Ag^{+1} lo que facilitaría la acción de éstos sobre las proteínas y evitaría su inactivación por la formación de sales (especialmente por el contacto con iones cloruro), además por su tamaño ofrecen una mayor área de contacto por unidad de masa, lo que aumenta su potencial antimicrobiano (Kemp et al., 2009). En este sentido se ha reportado que las nanopartículas de plata con formas que favorecen mayores áreas de contacto presentan mayor capacidad inhibitoria del crecimiento de microorganismos.

El efecto de las nanopartículas de plata aplicadas en bacterias Gram positivas, Gram negativas y hongos saprofitos, ha manifestado la eficacia antimicrobiana en mayor proporción con las nanopartículas de plata de menor tamaño, se determinó que aunque se daba aglomeración de las nanopartículas en ciertos puntos, se presentaba actividad antifúngica y antibacteriana pronunciada en *Aspergillus niger*, *Penicillium phoeniceum* y *Staphylococcus* (Khaydarov, 2009).

Nanopartículas de fierro. Las nanopartículas de fierro aplicadas al follaje de las plantas promueven la eficiencia fotosintética de las plantas, en un estudio realizado por (Zhu et al., 2008) ha encontrado que las plantas de calabaza (*Cucurbita máxima*), al someterlas a aplicaciones de NPs de magnetita (Fe_3O_4) pueden absorber, traslocar y acumular las NPs en el tejido vegetal.

Nanotubos de carbón. Los nanotubos de carbón (NTC) forman parte de la agronanotecnología, debido a sus propiedades que han mostrado como un material interesante de aplicar en la ciencia de las plantas. Donde ha sido observada la capacidad que tienen para penetrar la pared celular y la membrana de las células de tal manera que facilitan la absorción del agua y nutrientes a causa de la formación de canales de transporte adicionado, otra característica que manifiestan es actuar como sistema de suministro para determinados productos químicos especializados para las células. Diversos estudios han demostrado la capacidad de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs) para influir positivamente en la germinación y crecimiento de las plantas. Villagarcia et al., (2012) y Tiwari et al., (2014) encontraron que MWCNTs indujeron un aumento de agua, calcio, y la absorción de fierro, que mejoro la germinación de las semillas y el crecimiento de la planta.

Otra de las ventajas en el uso de los NTC también se aplica como promotor de crecimiento en diferentes sistemas vegetales (tomate, soja, repollo, zanahoria, ballico, colza y maíz) además de mostrar un impacto positivo y/o negativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas sometidas a diferentes concentraciones. Los NTC también han mostrado efectos positivos en la producción de los cultivos en la expresión de la proteína canal de agua efectuadas a través de superficie de los nanotubos de carbono en plantas de solanáceas, provocando el aumento de la capacidad de absorción de agua. Algunos de los estudios realizados por Khodakovskaya et al., (2012) reporta que los NTC aumentaron la producción de tomate por doble en una concentración de 50 ppm en comparación con el control. Srinivasan y Saraswathi, (2010) aplicaron nanotubos de carbón en el tomate y explicó que facilitan la capacidad de absorción de agua y crecimiento de las plantas mediante la germinación de las semillas de tomate.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización del sitio experimental

La presente investigación se realizó en junio del 2016, consistió de dos etapas la primera se inició con la aplicación de NPsFe y MPsFe a diferentes concentraciones aplicadas al follaje y en drench en plantas de pimiento (*C. annuum*), en un invernadero tipo túnel modificado (Figura 1A) de tecnología media del CIQA, localizado en las coordenadas geográficas 25° 27' de Latitud Norte, 101° 02' de Longitud Oeste, con una altitud de 1610 msnm.

La segunda etapa se inició en el mismo mes de junio del 2016, donde se inició la germinación de la semilla de chile ancho (*C. annuum*) en charolas de almacigo para luego ser trasplantadas en bolsas de cultivo dentro de una casa sombra (Figura 1B).



Figura 1. Estructuras para el manejo de agricultura protegida que se utilizaron para realizar la presente investigación (A) Invernadero y (B) casa sombra.

5.2 Distribución de los tratamientos

Bioensayo 1. Promoción de crecimiento de plantas pimiento (*Capsicum annuum*) por efecto de NPsFe y MPsFe en diferentes concentraciones aplicadas vía foliar y en drench con fertilización incompleta; en el Cuadro 3 se muestra la concentración de las NPs y MPs que evaluaron en cada uno de los tratamientos.

Cuadro 3. Distribución de tratamientos de NPsFe y MPsFe aplicadas al follaje y en drench a plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) con fertilización incompleta y bajo condiciones controladas de invernadero

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Control 0 ppm	Micropartículas quelato Fe		Nanopartículas de Fe			
	25 ppm	50 ppm	25 ppm	50 ppm	25 ppm	50 ppm
	Aplicación vía drench	Aplicación vía drench	Aplicación vía foliar	Aplicación vía foliar	Aplicación vía drench	Aplicación vía drench
Fertilización Steiner incompleta (Sin Quelato de Fe)	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta	Fertilización incompleta

Bioensayo 2. Evaluación de diferentes proporciones de zeolita mezclada con sustrato inorgánico y su efecto en el comportamiento morfofisiológico en plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) aplicando fertirriego; en el Cuadro 4 se observa la proporción de sustrato contenido en cada uno de los tratamiento de este trabajo.

Cuadro 4. Distribución de los tratamientos de las diferentes proporciones de zeolita mezclada con perlita en plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) aplicando fertirriego. Z= Zeolita, P= Perlita

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

Fertilización Steiner Completa al 75 %						
--	--	--	--	--	--	--

5.3 Manejo del cultivo

Las plantas de *C. annuum* variedad DiCaprio Enza Zaden de la empresa Enza Zaden S.A de C.V, fueron adquiridas cuando tenían 45 días de edad. El trasplante de las plántulas de *Capsicum annuum* se realizó en macetas de polietileno con capacidad de 15 L (Figura 2A) con una proporción en volumen de sustrato en 60% de peat moss y 40% de perlita, donde se trasplantó una planta por cada maceta.

La programación de los riegos (Figura 2B) se inició 3 días con anterioridad al trasplante con motivo de adquirir la saturación del sustrato para evitar estrés al cambio de medio, la fertilización se inició 4 días después del trasplante de la plántula para adquirir una adaptación al medio, usándose una solución Steiner incompleta y estableciendo un sistema de riego por goteo alimentado directamente de un contenedor con capacidad de almacenamiento de 1.1 m³ (Figura 2C), distribuidos por una bomba de ½ hp de potencia y controlados por un temporizador digital (Figura 2D), la frecuencia de los riegos estaba establecida cada ½ hora con una duración de 5 min/riego empezando a las 8:30 am y terminando a las 5 pm, llevando el cultivo hasta los 30 días.



Figura 2. Sistemas utilizados y adaptados para el experimento en plantas de pimiento (*Capsicum annuum*).

La segunda etapa de la investigación se inició con la siembra de la semilla (Figura 3A) de chile ancho (*Capsicum annuum*) en el mes de junio para ser trasplantadas 45 días después de la germinación (Figura 3B), el trasplante (Figura 3D) se realizó en el mes de julio en bolsas para cultivos agrícolas con capacidad de 5 L en concentración de volumen en diferentes proporciones de zeolita mezclada con perlita.

Adoptando un sistema de riego por goteo alimentado de un contenedor con capacidad de 0.6 m^3 (Figura 3C), distribuido por una bomba de $\frac{1}{2}$ hp de potencia controlada por un temporizador digital (Figura 3F), la programación de los riegos se inició 4 días anteriores al trasplante con objetivo de saturar el sustrato, la fertilización (Figura 3E) se inició al 4 día después de trasplante una vez que la planta presentó mayor adaptación al nuevo medio, usando una solución Steiner al 75 %. La

frecuencia de los riego se dio cada $\frac{1}{2}$ hora con duración de 1 min/riego a inicios del cultivo empezando el programa a partir de las 9 am y finalizando a las 5 pm, llevando el cultivo hasta etapa de producción.

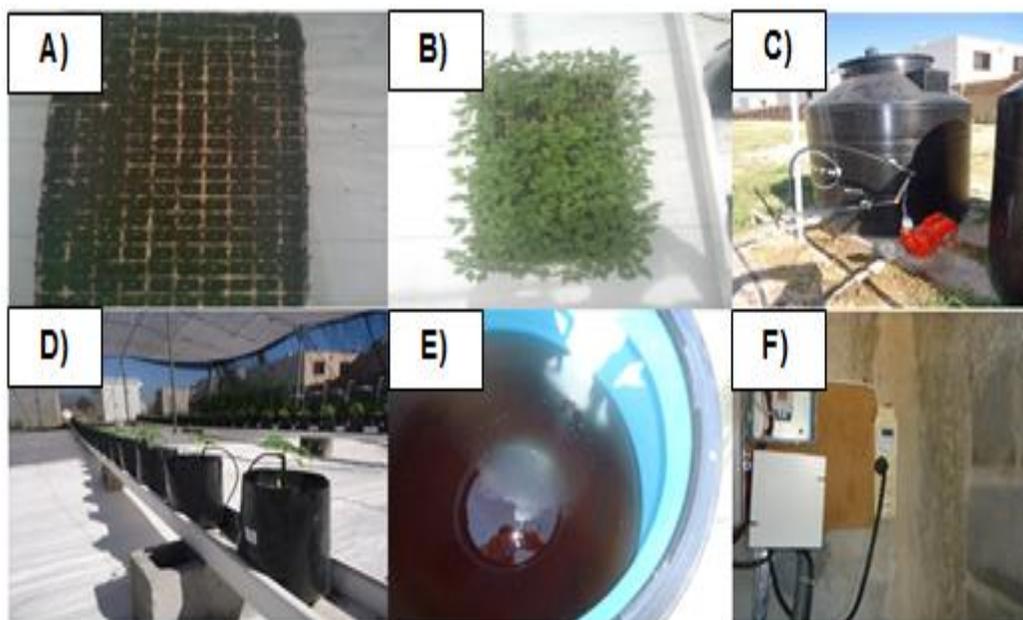


Figura 3. Manejo del cultivo en la primera etapa.

5.4 Preparación de la solución con nanopartículas

Las soluciones de NPsFe fueron preparadas con una concentración de 25 y 50 mg L⁻¹ diluidas en agua destilada y dispersadas con un sonicador modelo VC750 en tres ciclos de 15 minutos cada uno para ser usadas en los tratamientos.

5.5 Aplicación de nanopartículas a las plantas de pimiento

La aplicación de las NPsFe y MPsFe se establecieron en dos etapas; iniciando la primera a los 5 días después del trasplante, esta actividad se realizó operando en modo manual utilizando un aspersor para los tratamientos que van al follaje (Figura 4A) a una dosis de 1ml NPsFe por planta, en el caso de los tratamientos a los que se les aplicaran NPsFe y MPsFe en drench (Figura 4B) operando en modo manual usando una pipeta graduada como apoyo de precisión aplicando 1 ml por planta.

La segunda etapa se inició 16 días después del trasplante operando en modo manual para las NPsFe que van al follaje, para lo cual se siguió apoyando con un aspersor a una dosis de 2 ml por planta y para las NPsFe y MPsFe que van en drench se apoyó con la pipeta graduada aplicando una dosis por igual de 2 ml por planta y posteriormente evaluar el efecto que promueve las NPs y MPs de hierro en las plantas de pimiento hasta los 30 días; en la Figura 4 se aprecia el modo de operación.

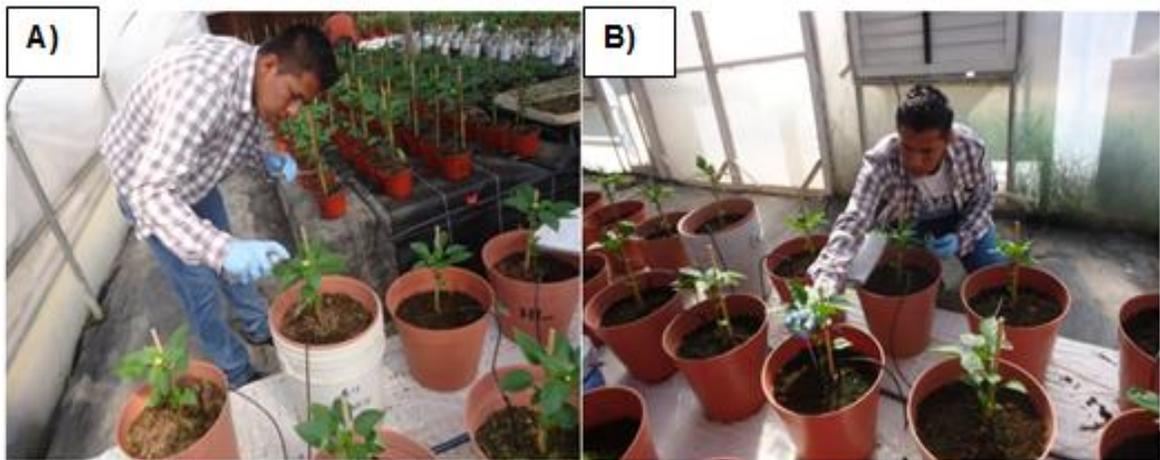


Figura 4. Aplicación de nanopartículas en plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) al follaje y en drench.

5.6. Metodología para la evaluación de las variables

Altura de la planta. En el caso de esta variable de estudio se midió apoyándose de una cinta métrica de 5 m, donde la primera lectura (Lectura cero) se inició 1 día después del trasplante para luego pasar a tomar lecturas semanales en el caso de las plantas de pimiento del primer bioensayo, en el bioensayo 2 la lectura cero se inició un día después del trasplante para luego determinarlas cada 15 días.

Diámetro de tallo. Esta variable se determinó apoyándose de un vernier digital (KD-TOOLS modelo KDT3756), en el bioensayo uno las lecturas fueron semanales excepto la lectura cero que fue 1 día después del trasplante, para el segundo

bioensayo las determinaciones fueron quincenales a partir de la lectura cero que se inició un día después del trasplante.

Número de hojas. Para esta variable las lecturas se dieron operando en modo manual pasando a contar el número de hojas en cada planta, las lecturas fueron semanales para el primer bioensayo y para el bioensayo dos fueron quincenales a partir de la lectura cero que en ambas fue un día después del trasplante.

Índice relativo de clorofila. Esta variable se determinó apoyándose con un medidor de clorofila (SPAD-502) dando las lecturas en unidades SPAD, donde las mediciones fueron semanales para el primer bioensayo y para el bioensayo dos fueron quincenales a partir de la lectura cero que en ambas fue un día después del trasplante.

Número de frutos. Esta variable fisiológica se culminó de modo manual, las lecturas fueron semanales y quincenas según sea el caso de los bioensayos y se inició el conteo desde la aparición de botones, número de flores, hasta obtener el número de frutos total por planta.

Fotosíntesis y conductancia estomática. Se apoyó con un medidor portátil de fotosíntesis (IRGA) de la marca LINCOR modelo LI-6400, la lectura en el bioensayo 1 se realizó en la tercera semana después del trasplante del cultivo de pimiento realizando 2 lecturas por tratamiento, la primer lectura se midió dentro del invernadero comparadas con la segunda lectura determinada fuera del invernadero a temperatura ambiente. Las lecturas del bioensayo 2 se determinaron en la semana 10 después de trasplante midiendo un total de 3 lecturas por tratamiento.

Área foliar. Esta variable se determinó a los 30 días después de trasplante del bioensayo 1, donde se realizó una poda destructiva de 5 plantas por tratamiento y apoyándose con un planímetro óptico de la marca LINCOR modelo LI-3100, la lectura del segundo bioensayo se determinó a las 11 semanas después de trasplante usando el mismo aparato y tomando un total de tres plantas por tratamiento.

Longitud de raíz. Esta variable se determinó a los 30 días después de trasplante apoyándose con una cinta métrica de 5 m, donde se determinó un total de 5 lecturas por tratamiento, en el caso del segundo bioensayo se decretaron tres lecturas por tratamiento y se midió al final de la semana 11.

Biomasa aérea fresca. Para la medición de esta variable se contempló la sumatoria de las variables peso fresco de hojas, peso fresco de tallo y peso fresco de raíz, realizando un total de 5 determinaciones por tratamiento realizadas a los 30 días después de trasplante en el caso del bioensayo 1 y a las 11 semanas después de trasplante del bioensayo 2 con un total de 3 lecturas por tratamiento

Biomasa aérea seca. En esta variable de estudio se contempló la sumatoria de las variables peso seco de hojas, peso seco de tallo y peso seco de raíz, realizando un total de 5 determinaciones por tratamiento realizadas a los 30 días después de trasplante en el caso del bioensayo 1 y a las 11 semanas después de trasplante del bioensayo 2 con un total de 3 lecturas por tratamiento

5.7 Análisis estadístico

En la presente investigación se estableció un diseño experimental completamente al azar en ambas etapas, en la primer etapa se establecieron siete tratamientos con 8 repeticiones cada uno. El análisis de las variables fisiológicas se realizó mediante un análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Duncan ($P \leq 0.05$), usando el software estadístico InfoStat, 2016.

Para la segunda etapa de esta investigación se estableció el mismo diseño experimental, donde se establecieron 7 tratamientos con 6 repeticiones cada uno, el análisis de las variables fisiológicas se realizó mediante un análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Duncan ($P \leq 0.05$).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bioensayo 1. Promoción de crecimiento de plantas *Capsicum annuum* por efecto de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe en diferentes concentraciones aplicadas vía foliar y en drench con fertilización incompleta. En la Figura 5 se puede observar el crecimiento promedio de las plantas con aplicación de NPsFe y MPsFe.

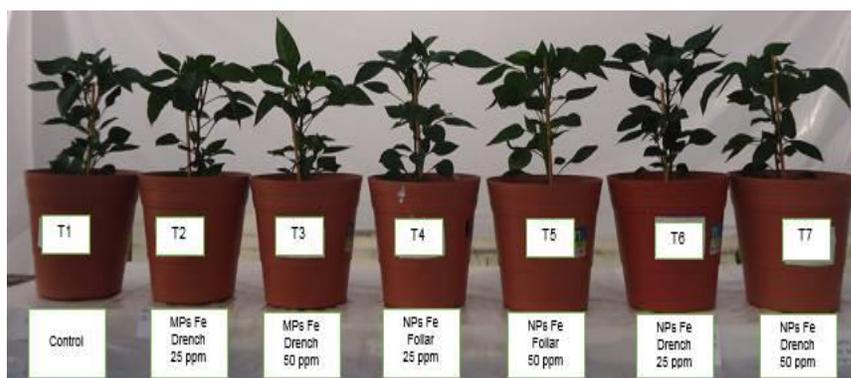


Figura 5. Crecimiento promedio de las plantas de pimienta (*Capsicum annuum*) sometidas a aplicaciones foliares y en drench de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe a concentraciones de 25 y 50 ppm.

Los resultados se presentan en el (Cuadros 5, 6 y Figura 7), donde se revela que las plantas que han sido sometidas a aplicaciones foliares y en drench no mostraron una diferencia significativa en la mayoría de las variables estudiadas excepto la variable peso fresco de raíz y peso seco del tallo donde sí se obtuvieron diferencias significativas.

Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza de las variables de los tratamientos sometidos a NPsFe y MPsFe a diferentes concentraciones aplicadas vía foliar y en drench.

Tratamientos	Tratamientos aplicados a las variables			
	Diámetro de tallo	Numero de hojas	IRC	Numero de botones
Control	5.97 ± (0.22)a	61.63 ± (3.44)a	61.06 ± (0.87)a	26.13 ± (2.01)a
MPsFe 25 ppm Drench	6.05 ± (0.35)a	57.13 ± (2.70)a	63.55 ± (1.31)a	22.75 ± (3.13)a
MPsFe 50 ppm Drench	5.84 ± (0.20)a	55.50 ± (2.21)a	60.14 ± (1.41)a	22.13 ± (2.19)a
NPsFe 25 ppm Foliar	5.77 ± (0.27)a	52.63 ± (4.04)a	59.56 ± (1.51)a	21.88 ± (3.13)a
NPsFe 50 ppm Foliar	5.70 ± (0.22)a	57.88 ± (3.31)a	60.39 ± (1.12)a	21.63 ± (1.82)a
NPsFe 25 ppm	5.63 ± (0.23)a	54.88 ± (3.49)a	60.19 ± (0.97)a	20.25 ± (1.89)a

Drench				
NPsFe 50 ppm	5.82 ± (0.20)a	55.50 ± (1.70)a	61.15 ± (1.33)a	22.00 ± (1.20)a
drench				

Valores con literal diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal en columnas no son significativos entre sí.

En la variable diámetro de tallo los resultados se exponen en el (Cuadro 5), donde se observa que los tratamientos no mostraron diferencias significativas pero expuestos en tendencia numérica si se manifestó que las plantas sometidas a MPsFe a 25 ppm aplicadas en drench si adquirieron una respuesta fisiológica obteniendo un incremento del 1.34 % (T2) con respecto a las plantas del tratamiento control.

Los resultados generados para la variable número de hojas, se exponen en el Cuadro 5. Los tratamientos con NPsFe y MPsFe presentaron valores inferiores a los del tratamiento control por lo que no hubo una respuesta fisiológica en producción de follaje. En la producción de número de botones florales los resultados obtenidos se presentan en el (Cuadro 5), en esta variable su buscaba una respuesta favorable en cuestiones de promoción de frutos pero el tratamiento control supero los tratamientos que han sido tratados con NPsFe y MPsFe por lo que no hubo diferencias significativas.

Respecto a la variable índice relativo de clorofila (Cuadro 5), se determinó que las plantas que sometidas a MPsFe a una concentración de 25 ppm (T2) aplicadas en drench han mostrado la mejor respuesta en contenido de clorofila adquiriendo un incremento del 4.08 %, las plantas sometidas a NPsFe (T7) a una concentración de 50 ppm aplicadas en drench también promovieron respuesta en contenido de clorofila al obtener un ligero incremento del 0.15 % con respecto a las plantas del tratamiento control.

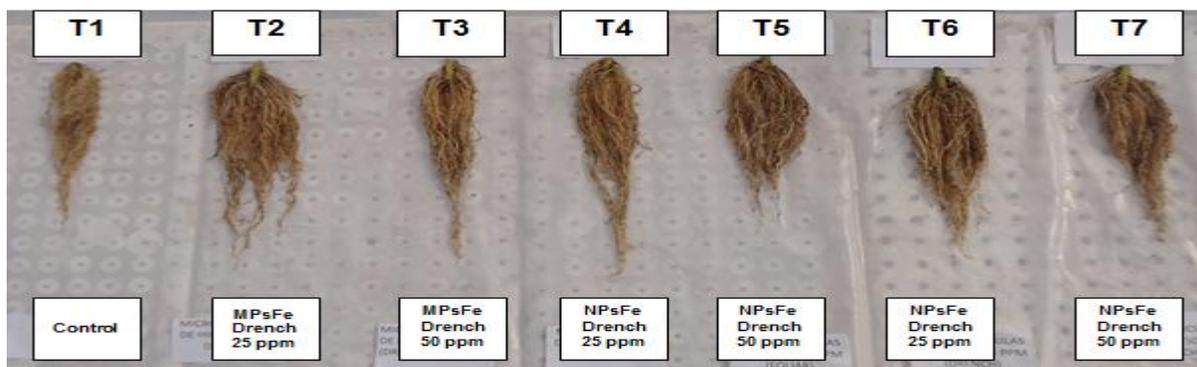


Figura 6. Crecimiento promedio de la raíz de plantas de pimienta (*Capsicum annuum*) sometidas a aplicaciones foliares y en drench de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe a concentraciones de 25 y 50 ppm.

En la Figura 6 se observa el desarrollo general que propiciaron las raíces de las plantas de pimienta en cada uno de los tratamientos, para esta variable los resultados se presentan en el (Figura 7C), en donde no se expresan diferencias significativas, pero por lo que respecta a una tendencia numérica, se pudo apreciar que las NPsFe y MPsFe promovieron desarrollo en longitud del sistema radicular en los tratamientos que han sido sometidos a MPsFe a una concentración de 25 y 50 ppm aplicadas en drench expusieron una respuesta en incremento de 5.58 % (T2) y 4.58 % (T3), al igual las plantas que fueron sometidas a NPsFe a concentraciones de 25 y 50 ppm aplicadas en dren demostraron obtener respuesta en incremento de 14.04 % (T6) y 0.65 % (T7) obteniendo un mejor desarrollo del sistema radicular comparadas a las plantas del tratamiento control que no han sido tratadas con NPs ni MPs.

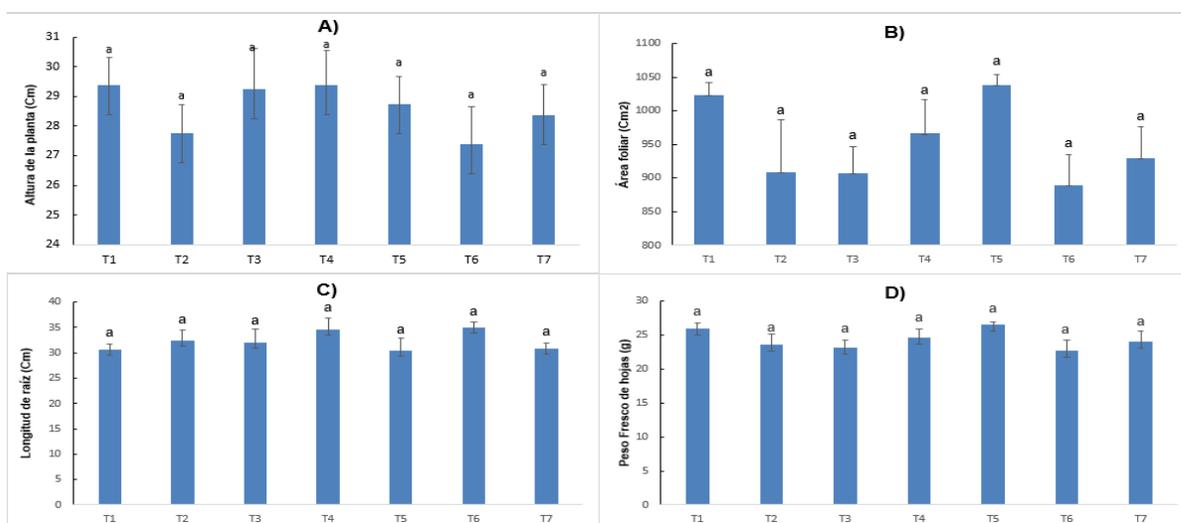


Figura 7. Muestra el análisis de varianza de las variables morfofisiológicas determinadas en las plantas de pimiento (*Capsicum annuum*); A) altura de la planta, B) área foliar, C) longitud de raíz, D) Peso fresco de hojas. Literales diferentes indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal no son significativos entre sí, la barra representa el error estándar de la media.

Los resultados de peso fresco de raíz expuestos en el (Cuadro 6), indica que la aplicación de las NPsFe y MPsFe si promovieron el desarrollo del sistema radicular no mostrando diferencias significativas pero en tendencia numérica todos los tratamientos se han visto superiores al tratamiento control, donde las plantas que han sido tratadas con MPsFe a concentraciones de 25 y 50 ppm aplicadas en drench han obtenido un incremento del 8.61 % (T2) y 24.29 % (T3), al igual las plantas tratadas con NPsFe a concentraciones de 25 y 50 ppm aplicadas en drench presentaron un incremento del 41.71 % (T6) y 18.19 % (T7) con respecto a las plantas del tratamiento control.

En la variable de biomasa aérea fresca los resultados que se obtuvieron se muestran en el (Cuadro 6) observando que no se presentaron diferencias significativas pero en tendencia numérica las plantas tratadas con MPsFe a concentración de 50 ppm aplicadas en dren, respondieron favorablemente alcanzando un incremento del 1.18 % (T4) con respecto a las plantas del tratamiento control, también en la variable peso seco de hojas (Cuadro 6) se obtuvo un incremento del 2.43 % (T3) superando al tratamiento control pero sin marcar una diferencia significativa, la misma respuesta se observó en la variable peso seco de raíz (Cuadro 6) donde las plantas sometidas a MPsFe a una concentración de 50 ppm si obtuvieron respuesta favorable obteniendo un incremento del 2.98 % con respecto a las plantas del tratamiento control.

Cuadro 6. Comparaciones de medias lectura intermedia, en respuesta fisiológica de plantas de pimiento (*Capsicum annum*) aplicando nanopartículas a diferentes concentraciones de nanopartículas de Fe y micropartículas de Fe aplicadas vía foliar y en drench

Tratamientos aplicados a las variables				
Tratamientos	Biomasa aérea fresca	Peso fresco de hojas	Peso fresco de tallo	Peso fresco de raíz
Control	61.03 ± (2.46)a	25.91 ± (0.85)a	20.71 ± (1.10)a	14.41 ± (1.51)b
MPsFe 25 ppm Drench	57.99 ± (4.03)a	23.56 ± (1.59)a	18.78 ± (1.54)a	15.65 ± (1.07)ab
MPsFe 50 ppm Drench	59.22 ± (4.71)a	23.14 ± (1.02)a	18.16 ± (1.38)a	17.91 ± (2.61)ab
NPsFe 25 ppm Foliar	63.28 ± (3.78)a	24.58 ± (1.30)a	19.64 ± (2.43)a	19.06 ± (1.95)ab
NPsFe 50 ppm Foliar	67.22 ± (1.89)a	26.54 ± (0.38)a	22.74 ± (0.29)a	17.84 ± (1.41)ab
NPsFe 25 ppm Drench	61.75 ± (4.47)a	22.73 ± (1.51)a	18.60 ± (1.45)a	20.42 ± (1.70)a
NPsFe 50 ppm drench	60.27 ± (3.71)a	24.00 ± (1.55)a	19.13 ± (0.62)a	17.14 ± (1.87)ab
Tratamiento	Biomasa aérea seca	Peso seco de hojas	Peso seco de tallo	Peso seco de raíz
Control	7.94 ± (0.17)a	3.70 ± (0.12)a	2.56 ± (0.15)ab	1.68 ± (0.09)a
MPsFe 25 ppm Drench	7.55 ± (0.52)a	3.31 ± (0.20)a	2.51 ± (0.23)ab	1.73 ± (0.14)a
MPsFe 50 ppm Drench	7.70 ± (0.75)a	3.79 ± (0.47)a	2.24 ± (0.16)b	1.67 ± (0.18)a
NPsFe 25 ppm Foliar	8.66 ± (0.90)a	3.99 ± (0.50)a	2.86 ± (0.29)a	1.81 ± (0.13)a
NPsFe 50 ppm Foliar	7.97 ± (0.24)a	3.72 ± (0.08)a	2.64 ± (0.08)ab	1.61 ± (0.11)a
NPsFe 25 ppm Drench	7.43 ± (0.76)a	3.46 ± (0.42)a	2.25 ± (0.22)b	1.72 ± (0.16)a
NPsFe 50 ppm drench	7.15 ± (0.44)a	3.54 ± (0.31)a	2.22 ± (0.10)b	1.39 ± (0.13)a

Valores con literal diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal en columnas no son significativos entre sí.

Respecto a las plantas del tratamiento control, las plantas tratadas con nanopartículas de Fe a 25 ppm (T4) y 50 ppm (T5) aplicadas al follaje han tenido una mayor respuesta fisiológica en la mayoría de las variables estudiadas, donde han sido superiores a los demás tratamientos con mayor frecuencia, no revelaron diferencias significativas pero si hubo una tendencia favorable, mostrando una altura (T4; Figura 7A) similar al tratamiento testigo, también se obtuvo un incremento en área foliar del 1.5 % (T5; Figura 7B), longitud de raíz 12.75 % (T4; Figura 7C), biomasa fresca 10.14 % (T5; Cuadro 6) y 3.69 % (T4; Cuadro 6), peso fresco de hojas 2.43 % (T5; Figura 7D), Peso fresco tallo 9.80 % (T5; Cuadro 6), peso fresco raíz 32.27 % (T4; Cuadro 6) y 23.80 % (T5; Cuadro 6), peso seco de hojas 7.84 %

(T4; Cuadro 6) y 0.54 % (T5; Cuadro 6), peso seco de tallo 11.72 % (T4; Cuadro 6) y 3.13 % (T5; Cuadro 6), peso seco de raíz 7.74 (T4; Cuadro 6).

El efecto de las nanopartículas de Fe a una concentración de 25 y 50 ppm sobre la producción de biomasa seca en plantas de pimienta se expone en el Cuadro 6. Las plantas de *C. annuum* que fueron expuestas a las concentraciones de NPs de Fe aplicadas vía foliar en donde mostraron ser las plantas que presentaron el mayor incremento en producción de biomasa seca 9.07 % (T4; Cuadro 2) y 0.38 % (T5; Cuadro 6), superando a las plantas del tratamiento control.

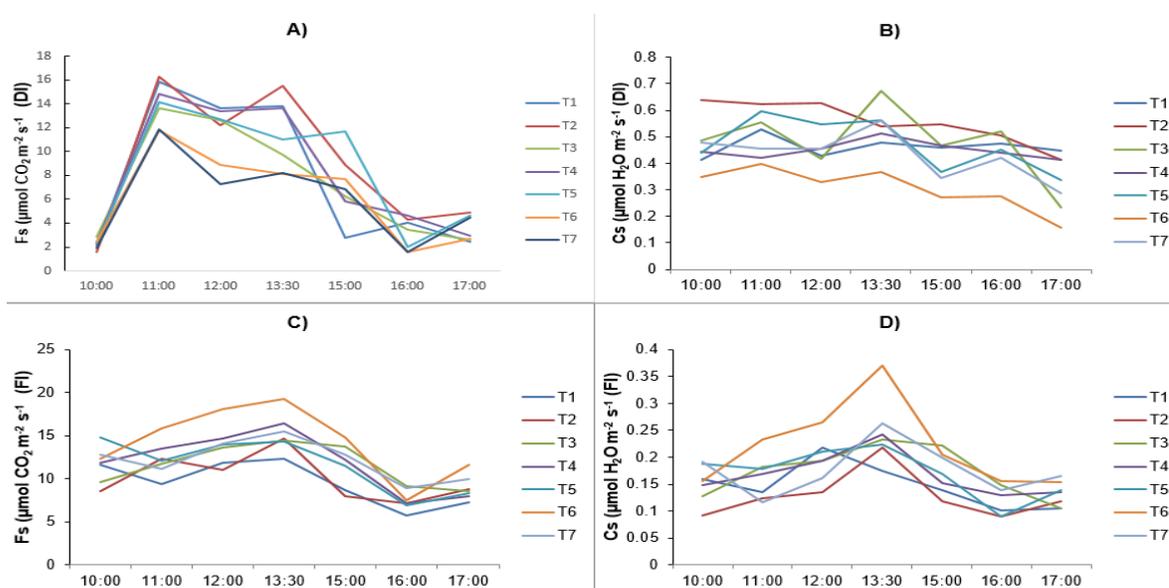


Figura 8. Resultados obtenidos del intercambio gaseoso en plantas de pimienta (*Capsicum annuum*) sometidas a aplicaciones de NPsFe y MPsFe. A) Fotosíntesis dentro del invernadero, B) Conductancia estomática dentro del invernadero, C) Fotosíntesis fuera del invernadero y D) Conductancia estomática fuera del invernadero.

Los resultados obtenidos de fotosíntesis (Figura 8) en las plantas de pimienta (*C. annuum*) nos revelan que las plantas que han sido sometidas a MPsFe a una concentración de 25 ppm aplicadas en drench fueron las que mayor respuesta fisiológica mostraron mismo que se refleja en ser las que mayor promovieron la tasa fotosintética dentro del invernadero durante casi todo el día, este fenómeno se asemeja por igual en la variable conductancia estomática donde fue constante su decadencia.

Estos mismos parámetros también se determinaron pero en plantas de pimientos colocadas fuera del invernadero a temperatura ambiente, el cambio de ambiente provoco una modificación en los resultados, obteniendo que las plantas sometidas a NPsFe a una concentración de 25 ppm aplicadas en drench fueron las que promovieron mayor tasa fotosintética, este fenómeno ocurre también en la variable conductancia estomática, mostrándose ampliamente superior al resto de los tratamientos. En la Figura 9 se observa el desarrollo promedio que adquirieron las plantas de chile ancho desarrolladas en mezclas de sustrato zeolítico.

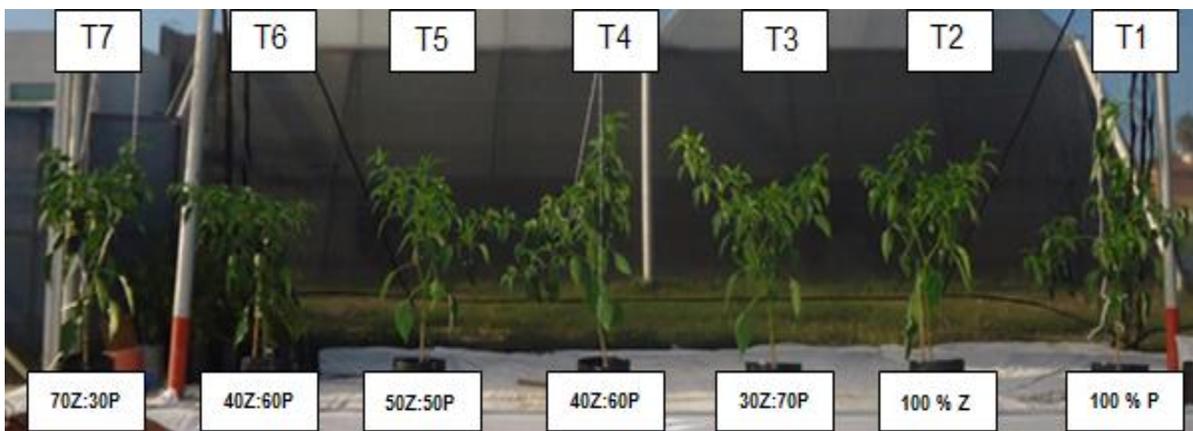


Figura 9. Crecimiento promedio de las plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) trasplantado en diferentes mezclas de zeolita y perlita.

En base a los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental se evaluaron 16 variables morfofisiológicas del efecto de la zeolita usada como sustrato hidropónico en plantas de *Capsicum annuum* mezclada con sustrato inorgánico (perlita) aplicando fertirriego, buscando obtener una mezcla de sustrato hidropónico idónea que permita obtener respuestas fisiológicas en promoción de crecimiento y rendimiento en las plantas aprovechando las propiedades de la zeolita (clinoptilolita) la capacidad de absorción y liberación lenta de los nutrientes al cultivo.

Los resultados que se obtuvieron fueron muy alentadores, las plantas desarrolladas en mezclas de sustrato que contenían proporciones de zeolita se mostraron muy superiores a las plantas desarrolladas en el sustrato del tratamiento control, donde se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la mayoría de las variables evaluadas, los resultados obtenidos se exponen en el Cuadro 7; Figuras 10 y 12).

En la variable altura (Figura 10A) los resultados muestran que se obtuvieron diferencias significativas, donde las plantas desarrolladas en proporciones de zeolita mezclada con perlita fueron superiores a las plantas del tratamiento control, siendo la mejor mezcla la que contiene una proporción 30:70 (T3) promoviendo un incremento del 8.74 %, al igual la mezcla con proporciones 60:40 (T6) revelo un incremento del 3.30 %, el mismo incremento resulto en la mezcla que contenía proporciones de 70:30 (T7) con un aumento ligero aumento de 0.41 % con respecto a las plantas del tratamiento control.

Resultados obtenidos de la variable diámetro del tallo se presentan en la (Figura 10B), dentro de esta variable se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) observándose los beneficios propiciados por la zeolita en la mayoría de los tratamientos, donde se revelo un incremento del 11.28 % (T3), 5.39 % (T6), 3.66 % (T7) y 3.05 % (T5) superando a las plantas desarrolladas en proporción de perlita al 100 %.

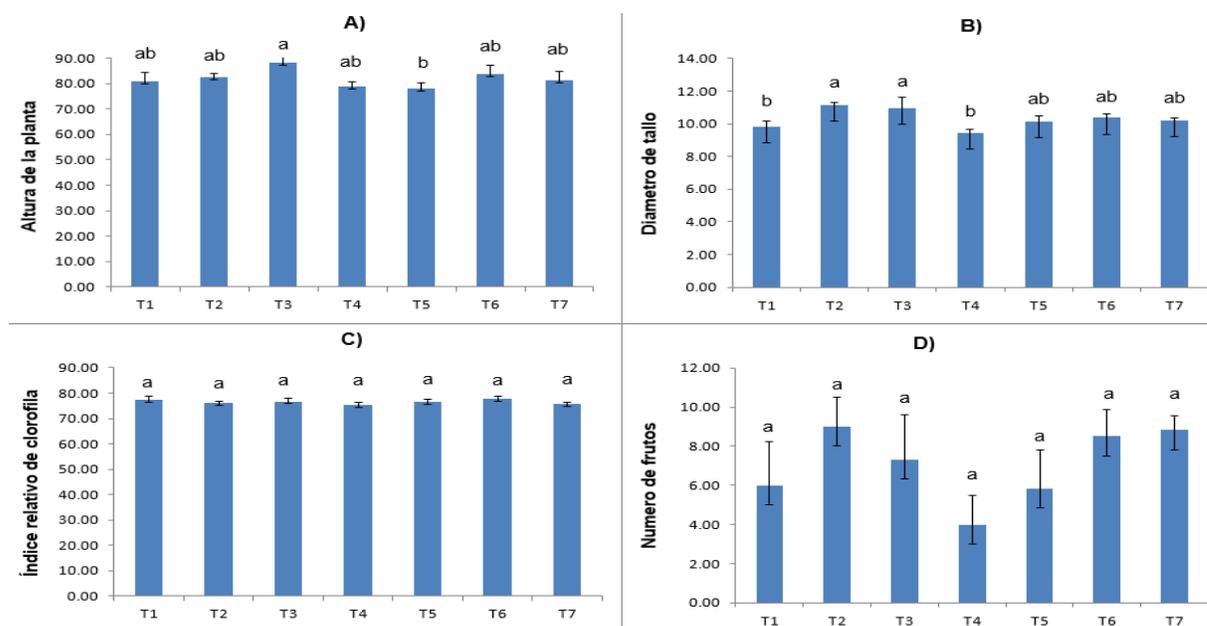


Figura 10. Análisis de varianza de las variables morfofisiológicas analizadas en las plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*); A) Altura de la planta, B) Diámetro del tallo, C) Índice relativo de clorofila, D) Numero de frutos. Literales diferentes indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal no son significativos entre sí, la barra representa el error estándar de la media.

El índice relativo de clorofila reveló resultados (Figura 10C) poco favorables, donde no se exponen diferencias significativas, pero en tendencia numérica se observa un ligero aumento de 0.46 % (T6) superior a las plantas del tratamiento control, en el que todos los demás tratamientos se vieron superados. Por otra parte la variable número de frutos arroja resultados (Figura 10D) donde si muestra diferencias significativas ($p < 0.05$), esto es porque se ostentó una respuesta fisiológica en relación a las propiedades que aporta la zeolita como sustrato, logrando un aumento del 47.13 % (T7), 41.67 % (T6) y 22.17 % (T3) con respecto a las plantas del tratamiento control.

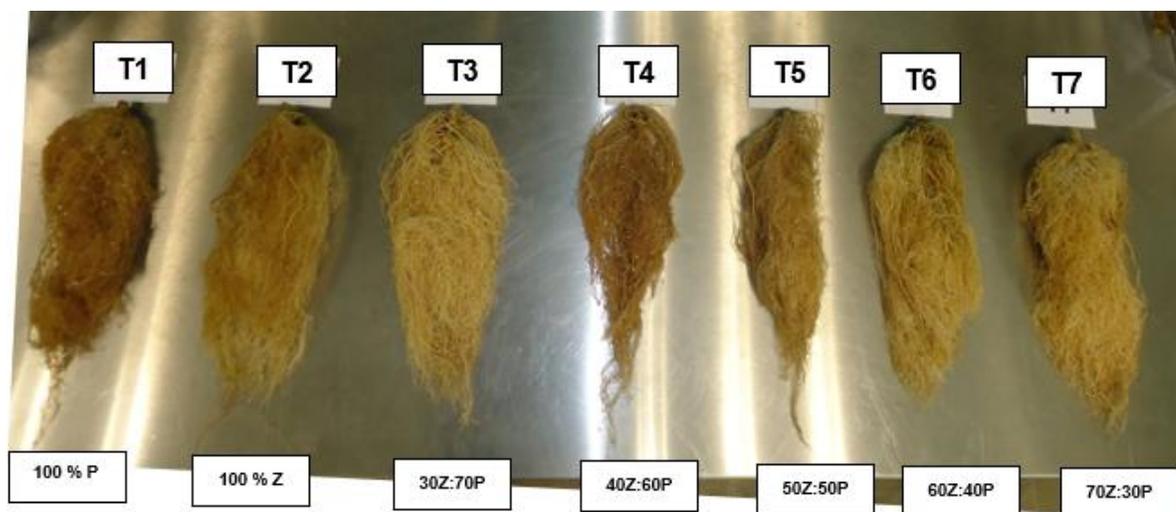


Figura 11. Crecimiento promedio de la raíz de plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) desarrolladas en diferentes mezclas de zeolita (clinoptilolita) y sustrato inorgánico (perlita).

En la figura 11 se expone el desarrollo promedio del sistema radicular de las plantas de chile desarrolladas en sustrato zeolítico de cada uno de los tratamientos, los resultados de la longitud de raíz (Tabla; Cuadro 7) presentan diferencias significativas ($p < 0.05$) a favor de las plantas desarrolladas en mezclas de zeolita, encontrando un incremento 5.87 % (T4), 5.03 % (T7) y un ligero incremento del 0.08 (T5) con respecto a las plantas desarrolladas en sustrato de perlita.

En los resultados de la variable área foliar se muestran en el Cuadro 7, se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los tratamientos que presentaron zeolita siendo claramente superiores al tratamiento control, mostrando incrementos del 57.80 % (T3), 49.48 % (T7), 39.54 % (T6), 30.22 % (T5), 16.60 %

(T4) con respecto a las plantas desarrolladas en perlita como sustrato, la interacción que hay de la zeolita como sustrato al realizar la liberación lenta de los nutrientes requeridos por la planta ha provocado el incremento en biomasa de las plantas evaluadas.

Cuadro 7. Resultados del análisis de varianza de las variables de estudio en plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) evaluadas en mezclas de sustrato zeolítico

Tratamiento	Área foliar	Peso fresco de hojas	Peso fresco de tallo	Peso fresco de raíz
100 % P	1406.93 ± (68.75)c	49,57 ± (1.21)c	67.31 ± (3.35)c	46.91 ± (2.73)b
100 % Z	2135.83 ± (61.36)a	72.70 ± (1.47)a	107.22 ± (5.69)a	95.94 ± (18.07)a
30 Z : 70 P	2220.07 ± (235.43)a	73.28 ± (4.72)a	110.57 ± (11.58)a	80.00 ± (16.60)ab
40 Z : 60 P	1640.52 ± (82.37)bc	58.02 ± (1.60)bc	82.36 ± (2.35)bc	46.92 ± (8.59)b
50 Z : 50 P	1832.08 ± (64.83)ab	64.73 ± (1.81)ab	99.15 ± (3.67)ab	68.55 ± (7.89)ab
60 Z : 40 P	1963.24 ± (205.50)ab	67.48 ± (4.77)ab	96.83 ± (8.55)ab	67.08 ± (6.85)ab
70 Z : 30 P	2103.06 ± (70.63)a	67.06 ± (3.02)ab	94.57 ± (4.78)ab	66.60 ± (1.63)ab
Tratamiento	Longitud de raíz	Peso seco de hojas	Peso seco de tallo	Peso seco de raíz
100 % P	39.20 ± (1.79)abc	10.61 ± (0.45)c	18.66 ± (1.19)c	10.33 ± (0.67)b
100 % Z	43.60 ± (3.38)a	15.07 ± (0.42)a	33.81 ± (2.70)ab	21.64 ± (6.67)a
30 Z : 70 P	36.50 ± (1.04)bc	15.47 ± (0.98)a	34.40 ± (1.71)a	16.77 ± (1.98)ab
40 Z : 60 P	41.50 ± (1.26)ab	12.13 ± (0.37)bc	30.93 ± (5.12)ab	11.47 ± (0.81)b
50 Z : 50 P	39.23 ± (0.89)abc	14.33 ± (0.61)a	28.79 ± (1.32)ab	13.80 ± (1.01)ab
60 Z : 40 P	33.93 ± (0.83)c	13.80 ± (0.74)ab	26.75 ± (2.44)abc	13.54 ± (1.53)ab
70 Z : 30 P	41.17 ± (1.42)ab	14.36 ± (0.82)a	25.49 ± (1.41)bc	13.29 ± (0.57)ab

Valores con literal diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal en no son significativos entre sí. P= perlita, Z= zeolita.

En la variable biomasa aérea fresca los resultados (Figura 12A) obtenidos se muestran una sinergia positiva con el uso de zeolita como sustrato hidropónico revelando diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los tratamientos, exponiéndose incrementos del 61.08 % (T3), 41.90 % (T5), 41.27 % (T6), 39.33 % (T7) y 14.35 % (T4) con respecto a las plantas del tratamiento control. Las diferencias significativas ($p < 0.05$) también se exponen en la variable biomasa aérea seca (Figura 12C) donde la mayoría de los tratamientos respondieron a las propiedades proporcionadas por la zeolita, en esta variable se presentan incrementos del 68.33 % (T3), 43.77 % (T5), 37.76 % (T4), 36.60 % (T6) y 34.23 % (T7) con respecto a las plantas del tratamiento control.

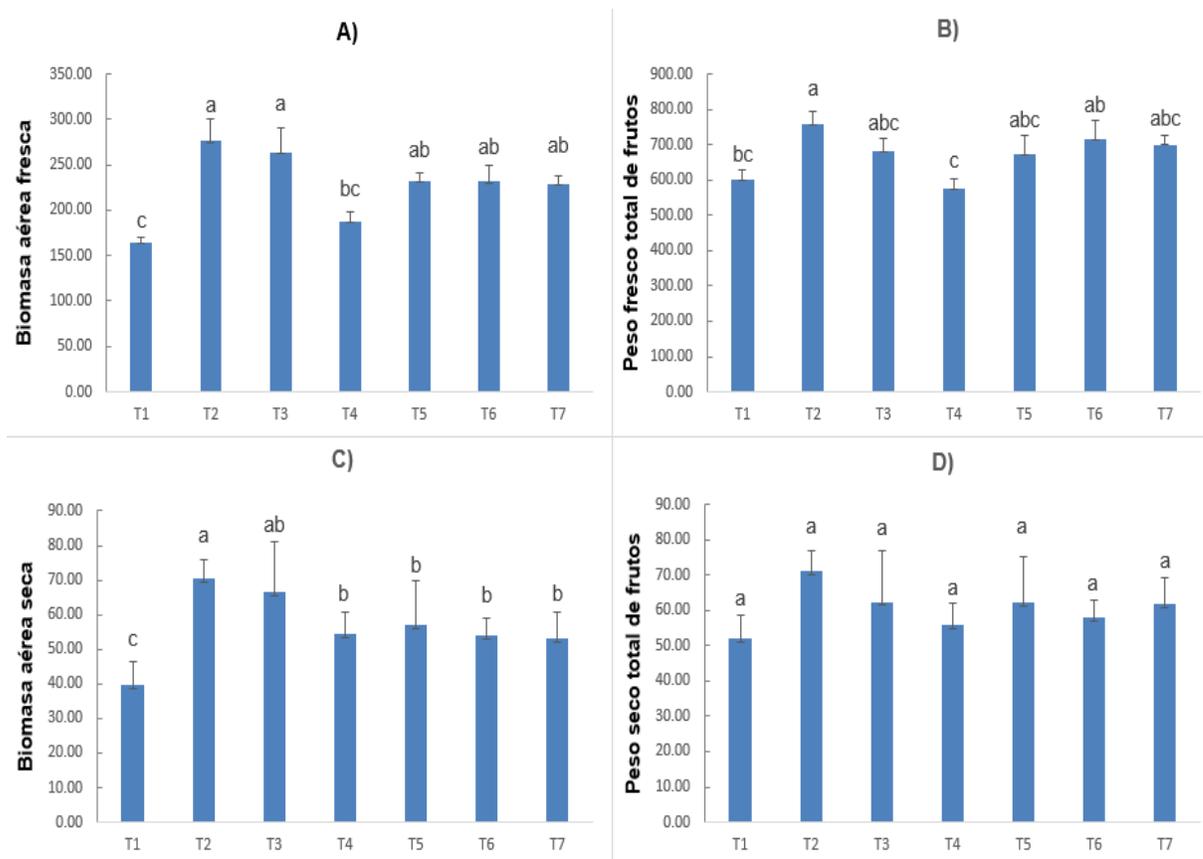


Figura 12. Análisis de varianza de las variables analizadas en las plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*); A) Biomasa aérea fresca, B) Peso fresco total de frutos, C) Biomasa aérea seca, D) Peso seco total de frutos.. Literales diferentes indica que existe diferencia significativa ($p < 0.05$), valores con la misma literal no son significativos entre sí, la barra representa el error estándar de la media.

El peso total de frutos se expone en la Figura 12B, el uso de zeolita propicio un incremento en un 18.63% (T6), 16.46% (T7), 13.42% (T3) y 11.67% (T5) provocando que se mostraran diferencias significativas ($p < 0.05$) a causa de la interacción respecto a la alta CIC que presenta la zeolita. Los resultados obtenidos de la variable peso seco total de frutos (Figura 12D) muestra una tendencia favorable al mostrar diferencias significativas ($p < 0.05$), los tratamientos donde se usó la zeolita mostraron un incremento del 20.07 % (T3), 19.67 % (T5), 18.59 % (T7), 11.55 % (T6) y 7.08 % (T4) superando ampliamente las plantas desarrolladas en perlita.

El tratamiento que tiene una proporción de 100% zeolita es el que más diferencias significativas ha marcado con respecto a los demás tratamientos, donde ha sido ampliamente superior a las plantas del tratamiento control, se ha promovido

mayor CIC, absorción y liberación lenta de cationes, mismos que se ven reflejados en las variables estudiadas en el desarrollo de este experimento, obteniendo incrementos en altura de la planta del 1.64 % (Figura 10A), diámetro de tallo en 13.41 % (Figura 10B), número de frutos en 50 % (Figura 10D), área foliar en 51.81 % (Cuadro 7), longitud de raíz en 11.22 % (Cuadro 7), biomasa aérea fresca en 68.41 % (Figura 12A), peso fresco de hojas en 46.66 % (Cuadro 7), peso fresco del tallo en 59.29 % (Cuadro 7), peso fresco de raíz en 104.52 % (Cuadro 7) peso fresco total de frutos en 25.77 % (Figura 12B), biomasa aérea seca en 78.10 % (Figura 12C), peso de hojas en 42.04 % (Cuadro 7), peso seco de tallos en 81.19 % (Cuadro 7), peso seco de raíz en 109.49 % (Cuadro 7) y peso seco total de frutos en 37.06 (Figura 12D).

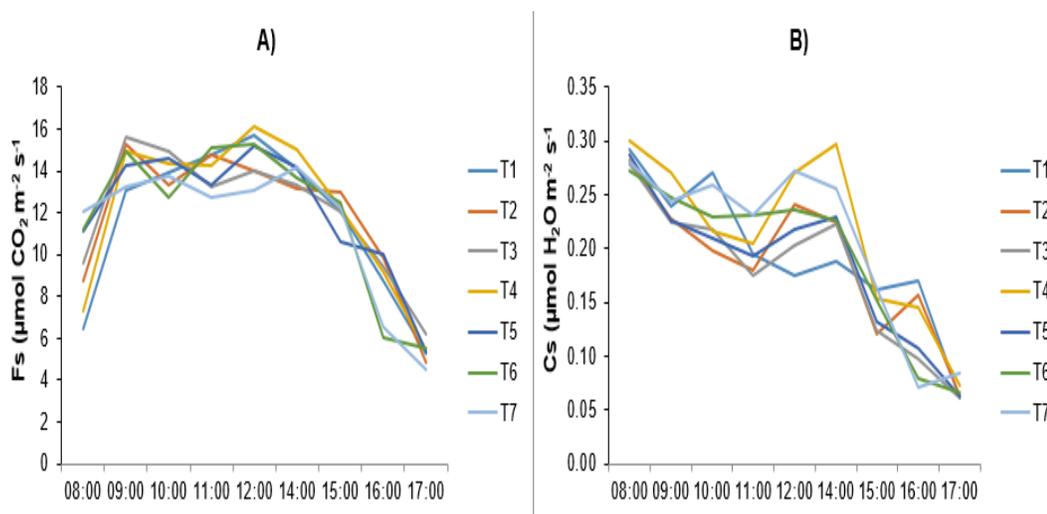


Figura 12. Resultados del intercambio gaseoso en plantas de chile ancho (*Capsicum annuum*) desarrolladas en diferentes proporciones de zeolita mezcladas con sustrato inorgánico aplicando fertirriego. A) Fotosíntesis y B) Conductancia estomática.

En base a los resultados se indica que la interacción de la zeolita con perlita a una proporción de 40:60 fue la que promovió mayor tasa fotosintética (Figura 13A), esto después de mediodía (Figura 13A) mostrando su máximo incremento y adquiriendo una tendencia ascendente pasando a superar a los demás tratamientos. Similar situación ocurrió en la variable conductividad estomática (Figura 13B) donde se apreció una serie de altibajos en las primeras horas de la mañana a causa de esto su máximo incremento se detectó después del mediodía.

VII. DISCUSIÓN

En plantas de *C. annuum* se expresó un incremento en desarrollo de algunas variables fisiológicas al ser sometidas a aplicaciones de nanopartículas de Fe, algunos autores señalan que las NPsFe aplicadas vía foliar en concentraciones bajas incrementa la eficiencia fotosintética de la planta, también se menciona que las NPs Fe_2O_3 suspendidas en un medio líquido llegan a ser absorbidas por las plantas para ser translocadas a los tejidos de las plantas. Los efectos de las NPs Fe_2O_3 promueven cambios fisiológicos en la planta además de incrementar la actividad de las enzimas para la captación, translocación, e interacción de las NPs con el tejido vegetal. Un estudio realizado por (Miller et al., 1984) comprueba que el hierro interviene en la fotosíntesis, debido a que cataliza la síntesis de clorofila.

El hierro es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas juega un importante papel en las reacciones fotosintéticas. El hierro activa varias enzimas y contribuye a la síntesis de ARN y mejora el rendimiento de la fotosíntesis de la planta (Sheykhbaglou et al., 2012). Algunos informes reportan sobre la influencia del óxido de hierro en el crecimiento de las plantas donde se obtienen evidencias optimistas.

Un estudio expuesto por Zhu et al. (2008) revela que las plantas de calabaza (*Cucurbita máxima*) al aplicarles nanopartículas (Fe_3O_4) se pueden absorber, traslocar, y acumularse en el tejido vegetal, Roghayyeh et al. (2010) revelan que las NPsFe incrementan la cantidad de biomasa en plantas de soya (*Glycine max*), los resultados que se obtuvieron de producción de biomasa al realizar aplicaciones de NPsFe en plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) coinciden con los resultados obtenidos por Roghayyeh et al. (2010) en donde las plantas que fueron sometidas a aplicaciones de NPs fueron superiores a los plantas control.

Otro estudio realizado por Ursache-Oprisan et al. (2011) reporta que el contenido de clorofila en plántulas de girasol suministradas a bajas concentraciones de nanopartículas magnéticas de hierro administradas en el medio de cultivo, durante

sus primeras etapas ontogénicas, se puede tener una posible base como nueva herramienta biotecnológica para controlar el crecimiento de las plantas, lo que nos dice que en condiciones óptimas se puede beneficiar más las plantas.

En las plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) sometidas a aplicaciones foliares de NPsFe no coincide con lo que reporta Ghafariyan et al. (2013), ya que reporta que bajas concentraciones de NPsFe aplicadas foliarmente incrementa significativamente el contenido de clorofila en las hojas de plantas de soya (*Glycine max*) cultivadas en condiciones de invernadero, el efecto que causaron las NPs en esta variable bajo condiciones de invernadero en plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) apenas y se adquirió una respuesta favorable puesto que en su mayoría el contenido de clorofila que presentaron las plantas del tratamiento control fue significativamente superior al resto de los tratamientos.

En el estudio de Delfani et al. (2014) reporta que la aplicación foliar de 500 mg L⁻¹ de NPsFe a plantas de chícharo (*Vigna sinensis*), que aumentó significativamente el número de vainas por planta (47%), número de semillas (7%), contenido de Fe en las hojas (34%) y el contenido de clorofila (10%), en comparación con valores de las plantas control, la aplicación de NPsFe también mejoró el rendimiento en comparación con las plantas a las que se les aplicó fertilización tradicional. En relación con el estudio realizado por Delfani et al., (2014) los resultados que se obtuvieron en las plantas de pimiento (*C. annuum*) sometidas a las aplicaciones foliares de NPsFe no coincidieron en su totalidad puesto que no mostraron superioridad en promoción de botones florales por lo que fueron inferiores a las plantas control, esto es a etapa de plántula.

En relación a los resultados que se obtuvieron en plantas de pimiento que han sido sometidas a NPsFe se expone que las plantas no mostraron un incremento en la tasa fotosintética, esto en relación a lo que menciona Munns et al. (2006) expone que la salinidad es uno de los procesos que pueden llegar a afectar la fotosíntesis, junto con el crecimiento celular.

Reche (2008), menciona que la tasa fotosintética está relacionada con el contenido de humedad de las plantas, puesto que al presentarse estrés hídrico los estomas de las hojas tornan a cerrarse anulando la entrada de CO_2 e interrumpiendo el proceso de fotosíntesis; pero no se coincide totalmente con lo que expone Munns y Tester, (2008), quienes relacionan el incremento de la tasa fotosintética cuando se adquiere un mayor índice de área foliar, los resultados expuestos en este trabajo muestran que plantas que fueron sometidas a MPsFe a concentraciones bajas obtuvieron el mayor incremento tanto en fotosíntesis como en conductancia estomática, esto bajo condiciones controladas dentro del invernadero, presentando un índice de área foliar bajo comparado con los demás tratamientos.

Esta respuesta no se observó en plantas de pimienta que se encontraban a temperatura ambiente; los resultados fueron adversos a los que se presentaron las plantas de pimienta en condiciones controladas, Raftoyannis y Radoglou, (2002), por su parte mencionan que una menor conductancia estomática reduce la pérdida de agua, disminuyendo la tasa de desarrollo de estrés y minimizando su severidad pero que al mismo tiempo reduce la entrada de CO_2 ; en este caso las plantas presentaron estrés hídrico por lo que se interrumpió el proceso de fotosíntesis, dando lugar a plantas de pimienta que presentaban valores bajos en la tasa fotosintética bajo condiciones controladas, fueron las que no mostraron mucho cambio al presentar estrés hídrico, debido a que fueron las que mayor fotosíntesis generaron durante el transcurso del día.

La alta CIC de las zeolitas contribuye al incremento de la conductividad eléctrica del suelo o sustratos de crecimiento, debido a que estos aluminosilicatos pueden introducir cationes al agua. Se ha señalado que esa alta CIC y la afinidad por el amonio (NH_4) que tiene la zeolita, incrementa la absorción de N en las plantas (Campisi et al., 2016). De la misma manera la habilidad de retener y liberar lentamente los nutrientes permite que las plantas puedan absorber más eficientemente los macro y micro nutrientes (Ozbahce et al., 2015).

Respecto a la zeolita su contenido de silicio (Si), pudiera estar ayudando al mejor crecimiento de las plantas, ya que el Si induce protección contra el estrés

abiótico, incrementa las fitoalexinas y fenoles, peroxidasa, polifenoloxidasas y quitinasa en algunos cultivos como *Cucumis sativus* (D'Imperio et al., 2015). La zeolita es conocida por promover el rendimiento de los cultivos, mejorar la condición del suelo, mejora la absorción de nutrientes, uso eficiente del agua y la actividad biológica. Una ventaja adicional de la zeolita es que aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo lo que conduce a una mayor disponibilidad de estos a las plantas durante un período de tiempo más largo (Lateef et al., 2016).

La zeolita absorbe nutrientes como hierro, manganeso y zinc del suelo y los libera para las plantas, y por lo tanto puede aumentar la síntesis de clorofila (Najafinezhad et al., 2015). El incremento de la fotosíntesis puede ser probablemente por la habilidad que tiene la zeolita de retener y liberar los nutrientes y agua para las plantas, la presencia de suficiente potasio y agua resulta en la apertura de estomas y en un incremento de la conductancia estomática, lo que puede incrementar la tasa fotosintética (Abdi et al., 2010).

La adición de la zeolita como sustrato o adicionado al suelo promueve un aumento en el rendimiento de las cosechas, la retención de humedad, evita las enfermedades propias de las raíces de las plantas (Casals, 1988), debido a que es un mineral volcánico cuyas cualidades físicas contribuyen a mejorar las características del suelo lo que influye en optimizar la absorción de nutrientes por parte de las plantas y por lo tanto mejora el rendimiento. En general, el uso de zeolitas no solo eleva el nivel de las cosechas, sino que también mejora la germinación de las semillas y eleva la estabilidad de la planta respecto a las enfermedades. (Nikolaev, 1997).

Los resultados expuestos anteriormente, en plantas de chile ancho (*C. annuum*) expusieron resultados alentadores para el uso de zeolita (clinoptilolita) como sustrato hidropónico en cultivos desarrollados en agricultura protegida, debido a que la zeolita provee características que otros sustratos no se les adjudica, dando lugar a preservar propiedades de las cuales las plantas usan para su beneficio y es por eso que promovió una tendencia favorable en los resultados obtenidos, contradiciendo lo que reporta Milosevic et al. (2013), donde menciona que el uso de

la zeolita sola no logra suministrar los nutrientes necesarios como N, y K para obtener altos rendimientos por lo que recomiendan usarla junto a abonos orgánicos e inorgánicos.

Por otra parte, los resultados de rendimiento coinciden con lo que reporta Khodaei et al., (2012), argumenta que la zeolita tiene una alta CIC, lo que mejora el suelo y la disponibilidad de los elementos alrededor del sistema radicular, provocando aumento en el rendimiento de los cultivos. La aplicación de zeolita presenta beneficios en la producción de granos frente a la producción de biomasa del cultivo de maíz, en el caso particular de N, puede ser atribuido a la disponibilidad de formas minerales ($N-NH_4^+/N-NO_3^-$) y al efecto regulatorio de la zeolita en los procesos de transformación del nutriente, en relación con la afinidad en la absorción de una u otra forma por la planta (Acon et al., 2013). Igualmente por su aporte equivalente a la biomasa en función de su facilidad para ser metabolizada para la producción del radical amino ($R-NH_2$) y la incorporación de N a la materia viva a través de glutamato (Osorio, 2014).

Los resultados obtenidos en este trabajo usando proporciones de zeolita con perlita en plantas de chile ancho (*C. annuum*) coincide con el estudio realizado por Campos et al. (2010) donde demostró que se pueden reducir las pérdidas de fertilizante con la adición de zeolitas y de esta manera mejorar el rendimiento de biomasa seca y la absorción de N en raigrás italiano, resultados donde se incrementó considerablemente la producción de biomasa aérea fresca de igual manera se obtuvo incremento en la producción de biomasa seca. El trabajo de Tsadilas et al. (2006) demuestra en estudios realizados la capacidad de la zeolita (clinoptilolita) natural para aumentar la eficacia de absorción de fertilizantes nitrogenados en cultivo de trigo, reflejándose en un incremento significativo en la producción de biomasa.

Las plantas de chile ancho que fueron desarrolladas con proporciones de zeolita obtuvieron incrementos en altura coincidiendo con lo que reporta Jayasinghe et al. (2010), mencionan que la zeolita mejora física y químicamente las características de los sustratos adicionados con este material en comparación con sustratos sin zeolita, obteniendo siempre mejor crecimiento y rendimientos máximos

con sustratos zeolíticos, Rydenheim (2007) menciona que la utilización de zeolita puede mejorar el crecimiento y desarrollo de algunos cultivos como el tomate y finalmente lograr minimizar la contaminación, reduciendo al mínimo el impacto negativo por la aplicación de agroquímicos.

La fotosíntesis es sensible al estrés hídrico, agregando que la planta cierra sus estomas cuando no absorbe agua por lo tanto no hay absorción de CO_2 y este efecto se ve reflejado en plantas marchitas, flacidez de hojas e inclusive de tallos. Se considera que la fotosíntesis está en función de la concentración intercelular de CO_2 que cambia de acuerdo a la conductancia estomática, por lo que podemos mencionar que los resultados indican que la tasa de intercambio gaseoso depende principalmente de la conductancia estomática y esta de la humedad relativa.

El estudio reportado por Rahnama et al. (2010), menciona que la conductancia estomática es uno de los parámetros más sensibles del intercambio gaseoso que se propicia en la planta, debido a que cuando son sometidas las plantas a algún estrés hídrico, cierran por completo sus estomas tratando de regular la fotosíntesis; Liu et al., (2007), ha demostrado que diferentes niveles de estrés disminuyen el contenido de clorofila, también se comenta que mantener una humedad relativa baja, ocasiona un menor valor de la fotosíntesis, independientemente de las concentraciones de CO_2 .

En base a los resultados expuestos en las plantas de chile ancho desarrolladas en sustrato zeolítico; la mayor respuesta a la tasa fotosintética se presentó en el T4 (40Z:60P) al igual que la conductancia estomática; Chaves y Oliveira, (2004), Flexas et al. (2006), mencionan que los cambios en la bioquímica de la hoja pueden ocurrir en respuesta a la menor disponibilidad de sustratos de carbono bajo estrés prolongado, dando como resultado una baja regulación del metabolismo fotosintético, los resultados contrastan con lo que menciona Munns y Tester, (2008), quienes relacionan el incremento de la tasa fotosintética cuando se adquiere un mayor índice de área foliar, siendo que los valores de área foliar de este tratamiento fue de los más bajos en comparación al resto de los demás tratamientos,

esta respuesta se obtiene debido a lo que se coincide con lo que menciona Raftoyannis y Radoglou (2002), exponen que una menor conductancia estomática reduce la pérdida de agua, disminuyendo la tasa de desarrollo de estrés y minimizando su severidad pero que al mismo tiempo reduce la entrada de CO₂.

VIII. CONCLUSIÓN

Es importante señalar que en la agricultura moderna tradicional el uso de los fertilizantes sintéticos es una buena herramienta para complementar la nutrición de las plantas, ocasionando un incremento notable en el rendimiento de los cultivos agrícolas, pero de lo que poco se expone es el efecto negativo que estos generan en el medio ambiente, ya que han venido deteriorando los suelos y contaminando el agua, por tal motivo al día de hoy se trabaja en la búsqueda de tecnologías innovadoras y compatibles y amigables con el ambiente.

Una posible solución a la problemática antes señaladas es el uso de NPs metálicas, por sus múltiples usos como nanofertilizantes, concluyendo que las NPsFe aplicadas al follaje a concentraciones bajas fueron las que mayor respuesta fisiológica manifestaron al ser Fe el principal encargado de la activación de enzimas, hemoproteínas y tener participación directa en cuantiosos procesos metabólicos, interviniendo en el proceso de fotosíntesis y síntesis de clorofila, esta respuesta presento incrementos superiores a los resultados obtenidos de los otros tratamientos, en producción de biomasa, y promoviendo un sano desarrollo del sistema radicular, además de ser una de las mejores opciones viables para corregir la clorosis férrica.

Otra de las opciones para practicar una agricultura sustentable, es el uso de la zeolita (clinoptilolita) natural, debido a las propiedades físicas y químicas que esta presenta al mostrarse como un mejorador del suelo, descontaminante, fertilizante de liberación lenta, sustrato optimizador de nutrientes que promueve la producción de biomasa, crecimiento de las plantas, además de intervenir en el incremento del rendimiento en los cultivos, propiedades que se demostraron en los resultados obtenidos en el desarrollo de este experimento donde se obtuvieron incrementos

alentadores en las plantas desarrolladas en zeolita pura, tanto en rendimiento, producción de biomasa, altura de la planta, desarrollo sano del sistema radicular, concluyendo que la zeolita es una alternativa como sustrato hidropónico.

IX. LITERATURA CITADA

- Abdi, G., Khosh-Khui, M. y Eshghi, S. (2010). Effects of natural zeolite on growth and flowering of strawberry (*Fragaria xananassa* Duch.). *International Journal of Agricultural Research*, 5(9), 799-804.
- Acón, J., Umaña, C. y Wing Chin, R. (2013). Recuperación del ^{15}N en plantas de banano y en el suelo de áreas con origen sedimentario. *Agron. Mesoam.* 71-81.
- Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales. (2007). *Manual Técnico para Organopónicos, Huertos Intensivos y Organoponía Semiprotegida.*
- Aguado-Santacruz, G. A. (2015). Introducción al uso y manejo de los biofertilizantes en la agricultura. INIFAP/SAGARPA. México, 11-15.
- Ahmed, O. H., Aminuddin, H., Ahmad, H. M. H., Jajjoh, M. B., Rahim, A. A., and Majid, N. M. A. (2009). Enhancing the urea-N use efficiency in maize (*Zea mays*) cultivation on acid soils using urea amended with zeolite and TPS. *Am. J. Appl. Sci.* 829-833.
- Álvarez, L., Múnera, V., Nivia, D., Ramírez, R. y Gutiérrez, C. (2010). Efectos de la zeolita natural en la producción de cebolla puerro (*Allium porrum* L.). Trabajo de grado de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 60-61.
- Arregui, L. M. and Quemada, M. (2005). Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agron. J.* Pp. 277-284.
- Aumtong, S. (2009) *Slow-Released Fertilizers, Thailand.*
- Barbieri, P. A., Ehecverría, H. E., Sainz, R. and Andrade, F. H. (2008). Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.*
- Bradford, K. J. (2004). *Seed Production and Quality.* Department of Vegetable Crops. University of California. Davis, California, U.S.A. Pp. 134.
- Bekum et al., Bekum, V. H., Flanigen, E. M., Jacobs, P.A., Jansen, J. C. (1991). *Introduction to zeolites science and practice.* Elsevier, Amsterdam.
- Bosland, P. W. and E. J. Votava. (2000). *Peppers: Vegetable and Spice Capsicums.* CABI Publishing. New York. Pp. 204.
- Campisi, T., Abbondanzi, F., Faccini, B., Di Giuseppe, D., Malferrari, D., Coltorti, M. y Passaglia, E. (2016). Ammonium-charged zeolite effects on crop growth and nutrient leaching: greenhouse experiments on maize (*Zea mays*). *Catena*, 140, 66-76.

- Campos, B. A., Pereira, M. E., Henrique, S. S., Donizeti, C. R. y Anchao, O. P. (2010). Ammonia volatilization, dry matter yield and nitrogen levels of Italian ryegrass fertilized with urea and zeolite. *Agronomía, Unicastelo*. Pp. 22-25.
- Casals, C. (1988). *La Zeolita Mineral del Siglo XX*. Holguin: Plublicigraf. Pp. 9
- Collazos-García, H. (2010). La aplicación de zeolita en la producción avícola: Revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Pp. 17-23
- Chaves, M. M. and M. Oliveira. (2004). Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J*.
- Chen H., Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development.
- Chew-Madinaveitia, Y. I., Vega-Piña, A., Palomo-Rodríguez, M. & Jiménez-Díaz, F., (2008). Principales enfermedades del chile (*Capsicum annuum* L.). Matamoros (Coahuila): SAGARPA. INIFAP. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo experimental Laguna.
- Escorra, L., Pérez, C. (1989). *El mineral de siglo: Sus usos agropecuarios*. Ciudad Habana: CIDA.
- De Campos B., A. C., Anchão Oliviera, P. P., De Melo Monte, M. B., y Souza Barros, F. (2013). Brazilian sedimentary zeolite use in agriculture. *Microporous and Mesoporous Materials*. Pp. 167, 16 - 21.
- Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. Pp. 530-540.
- Delgado, G.C. (2007). Nanotecnología: Avances y retos. *Ciencia y Desarrollo*. Pp. 206.
- Ditta, A., Arshad, M., y Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: Applications and Perspectives. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. Pp. 55-75.
- Dubey, A. y Mailapalli, D.R. (2016). Nanopertilisers, nanopesticidas, nanosensores of pest and nanotoxicity in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews*. Pp. 307-330.
- D'Imperio, M., Renna, M., Cardinali, A., Buttaro, D., Santamaria, P. y Serio, F. (2015). Silicon biofortification of leafy vegetables and its bioaccessibility in the edible parts. *J Sci Food Agric*. Doi, 10, 1002. 1-6.

- FAO-SAGARPA. (2007). Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas. México. 33 pp.
- Febles, J. M., Amaral Sobrinho, N., Pérez, Y., Zoffoli, J.H. y Lima, M.O. (2014). Relación entre los procesos de erosión-sedimentación contaminación en suelos del Distrito Pecuario "Alturas de Nazareno. Cuba. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. Pp. 173
- Flexas, J., M. Ribas-Carbó, J., Bota, J., Galmés, M., Henkle, S., Martínez-Canellas, and H. Medrano. (2006). Decreased Rubisco activity during waterstress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. *New Phytol.* Pp. 73-82.
- Flores, M. A., Galvis, A., Hernández, T., León, F., Payan, F. (2007). Efecto de la adición de zeolita en un andosol sobre el ambiente químico y edáfico y el crecimiento de la avena. *Asociación Interciencia.* Pp. 692-696.
- Frejo, M. T., Díaz, M. J., Lobo, M. y Capó, M. (2011). Nanotoxicología ambiental: retos actuales. *Medicina balear.* Pp. 36-46.
- Garza, U. E., Rivas, M., Moreno, C. J. G. (2007). Manejo integrado de las plagas del chile y jitomate en el Altiplano de San Luis Potosí. *Campo Experimental Sur de Tamaulipas. Sitio Experimental Ébano. INIFAP-CIRNE. San Luis Potosí, México. Folleto para Productores No. 9.* Pp. 47.
- Garza, A. M., Molina, V. M. (2008). Manual para la producción de tomate en invernadero en suelo en el estado de Nuevo León. *Capitulo V. Manejo del cultivo.* Pp. 27-104.
- Guerrero, E. (1996). *Micorrizas recurso biológico del suelo.-Colombia: Fondo FEN,* Pp. 208.
- Grillo, R., Abhilash, P.C. y Fraceto, L.F. (2016). Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology,* 16; Pp. 1231-1234.
- González, C., Estavillo, J., Ma. González, M., González, A., Pinto, M., Merino, M. y Aizpurúa, A. (2007). Fertilización nitrogenada y sostenibilidad ambiental frente a producción y calidad.
- González-Estrada, A. (2004). Impacto económico del mejoramiento genético del chile jalapeño en México. *Publicación técnica ed. Distrito Federal: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.*

- Gorki, C., Sánchez, F., Llerena, L., Vascones, G. (2009). Empleo de zeolitas naturales en la fertilización y producción del frejol (*Phaseolus vulgaris* L.) en la zona de Quevedo. Revista Ciencia y Tecnología. Vol. 2. N°1. Pp. 1-6.
- Gül, A., Erogul, D. & Ongun, A. R. (2005). Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. Sci. Hortic. Pp. 464-471.
- Gutiérrez, C. E. (2005). Las nanopartículas. Pequeñas estructuras con gran potencial, ¿Por qué hay interés en estos materiales? ¿Qué aplicación tienen?. Instituto Nacional de Investigación Nucleares. Pp. 24-29.
- Ghafariyam M. H., Malakouti M. J., Dadpour M. R., (2013). Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll.
- Haro, M. F. 2011. Zeolita natural: triple impacto para el sector agropecuario Ecuatoriano.
- He, N., Xe, M. y Ding, Y. (2008). Computational study on IM-5 zeolite: What is its preferential location of Al and proton siting? Microporous and Mesoporous Materials. Pp. 551 - 559.
- Hiremath, S., Basavaraj, N. y Dharmatti, P. (2006). Response of location, spacing and fertilizer levels on yield and yield attributes of paprika. Karnataka Journal of Agricultural Sciences. Pp. 362-365.
- Hullmann, A. (2006). The economic development of nanotechnology - An indicator based analysis, European Commission, Unit "Nano S&T - Convergent Science and Technologies, Alemania.
- INFOAGRO. (2012). El cultivo del pimiento. Disponible en la página web (<http://www.infoagro.com/hortalizas/pimiento.htm>). Fecha de consulta (noviembre 2016).
- INIFAP. (2005). Tecnología de Producción de Chile, Libro técnico N° 5 Zacatecas, México.
- Inglezakis, V.J., Loizidou, M. D., Grigoropoulou, H. P. (2002). Equilibrium and kinetic ion exchange studies of Pb^{+2} , Cr^{+3} , Fe^{+3} , and Cu^{+2} on natural Clinoptilolite. Pp. 2784-2792.
- Instituto Riojano de Salud Laboral Logroño. (2001). La seguridad y salud en la exposición a nanopartículas. Logroño impreso en España-Printed in Spain. Pp. 1-50.
- Instituto Técnico y de Gestión Agrícola. (2011). Oídio del pimiento.

- Jaiswal, M., Chauhan, D., and Sankaramakrishnan, N. (2012). Copper chitosan nanocomposite: synthesis, characterization, and Application in removal of organophosphorous pesticide from agricultural runoff. *Environmental Science and Pollution Research*. Pp. 2055-2062.
- 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. Pp. 273.
- Jayasinghe, Y. G., Tokashiki, Y., Kinjo, K. y Arachchi, L. I. (2010). Evaluation of the use of synthetic red soil aggregates and zeolite as substrate for ornamental plant production. *Journal of Plant Nutrition*.
- Ju-Nam, Y. and Lead, R. (2008). Manufactured nanoparticles: An overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. *Science of the total environment*. Pp. 396-414
- Khaydarov, R. R., Khaydarov, R. A., Gapurova, O., Estrin, Y., Evgrafova, S., Scheper, T., Cho, S. Y. 2009. "Antimicrobial Effects of Silver Nanoparticles Synthesized by an Electrochemical Method." *Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications*. Pp. 215-218.
- Kemp M. M., Kumar A., Clement D., Mousa S., Linhardt R. J. (2009). Hyaluronan an heparinreduced silver nanoparticles with antimicrobial properties. *Nanomedicine*. Pp. 421-429.
- Khodaei, J. A., Ghalavand, A., Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M. y Dolatabadian, A. (2012). How organic and chemical nitrogen fertilizer, zeolite, and combinations influence wheat yield and grain mineral content. *Journal of Crop Improvement*. Pp. 116-129.
- 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.
- Lira-Saldívar, R. H., Méndez-Arguello, B. (2016). *Agronano tecnología*. Saltillo, Coahuila, México. Pp. 15-16.
- Liu, R. y Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*. Pp. 131-139.

- Liu, Z. I., Zhu, Y. L., Wei, G. P., Yang, L. F., Zhang, G. W. y Hu, C. M. (2007). Metabolism of ascorbic acid and glutathione in leaves of grafted eggplant seedling under NaCl stress. *Acta Bot. Boreal Occident Sin.*
- Malik, A., Chattoo, M., Sheemar, G. y R. Rashid. (2011). Growth, yield and fruit quality of sweet pepper hybrid SHSP-5 (*Capsicum annuum L.*) as affected by integration of inorganic fertilizers and organic manures (FYM). *Journal of Agricultural Technology*. Pp. 1037-1048.
- Mendoza, Z. C. (1999). Enfermedades fungosas de hortalizas y fresa. In: S. Anaya R. y J. Romero N. et al. *Hortalizas. Plagas y enfermedades*. México: Editorial Trillas.
- Mendoza, Z. C. & Pinto, C. B. (1985). *Principios de fitopatología y enfermedades causadas por hongos*. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de parasitología agrícola.
- Millán, G., Agosto, F., Vázquez, M., Botto, L., Lombardi, L., y Juan, L. (2008). Uso de Clinoptilolita como un vehículo de fertilizantes nitrogenados en un suelo de la región Pampeana de Argentina. *Cien. Inv. Agr.* Pp. 293-302.
- Miller, R. W., Pushnik, J. C., Welkie, G. W. (1984). Iron chlorosis, a world wide problem, the relation of chlorophyll biosynthesis to iron. *J. Plant Nutr.* Pp. 1-22.
- Milosevic, T., Milosevic, N. y Glisic, I. (2013). Tree growth, yield, fruit quality attributes and leaf nutrient content of 'Roxana' apricot as influenced by natural zeolite, organic and inorganic fertilisers. *Scientia Horticulturae*. Pp. 131 - 139.
- Mozumbera, P. and Berrensb, R. P. (2007). Inorganic fertilizer use and biodiversity risk: and empirical investigation. *Ecol. Econom.* Pp. 538-543.
- Munns, R. y Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant.* Pp. 651-681.
- Munns, R., James, R. A. y Laüchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp.* Pp. 1025-1043.
- Muñoz, H. (2003). La zeolita: Características y Beneficios en la fisiología de los cultivos. Pp. 1-5.
- Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plants Science*. Pp. 154-163.

- Najafinezhad, H., Tahmasebi, Sarvestani, Z., Modarres, Sanavy, S. A. M., & Naghavi, H. (2015). Evaluation of yield and some physiological changes in corn and sorghum under irrigation regimes and application of barley residue, zeolite and superabsorbent polymer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(7), 891-906.
- Naderi, M. R. y Danesh-Shahraki, D. A. (2013). Nanofertilizers and their roles in sustainable agricultura. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Pp. 2229-2232.
- Neeteson, J. J., Booij, R. and Whitmore, A. P. (1999). A review on sustainable nitrogen management in intensive production systems. *Acta Horticulturae*, 506: 17-26
- Nikolaev, S. (1997). Posibilidades de utilización de zeolitas en las industrias nacionales. Heredia: CEPIS. Pp. 8
- Nuez, F., Ortega R. G. y Costa, J. (2003). El cultivo de Pimiento, Chiles y Ajíes. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-España. Pp. 586.
- Nuez-Viñals, F., Gil-Ortega, R. & Costa-García, J. (2003). El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Primera edición ed. S.I.: Ediciones Mundi-Prensa.
- Osorio, E., Sánchez, J. J., Martínez, Cano, M., Montaña, A. M. (2003). Estudio de contenido en triglicéridos de aceites monovarietales elaborados a partir de aceitunas producidas en la región extremeña. *Grasas y Aceites*. Pp. 1-6.
- Osorio, N. W. (2014). Manejo de nutrientes en suelos del Trópico. Segunda edición. Medellín, Colombia: Vieco S.A.S. Pp. 177-206.
- Ozbahce, A., Tari, A. F., Gönülal, E., Simsekli, N., & Padem, H. (2015). The effect of zeolite applications on yield components and nutrient uptake of common bean under water stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(5), 615-626.
- Pandey, A.C., Sanjay, S. S., Yadav, R. S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental nanoscience*. Pp. 488-497.
- 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 Science*. Pp. 71-84.
- Penningsfeld, F., Kurzmann, P. (1983). Cultivos hidropónicos y en turba. 2.^a ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, Pp. 343.

- Perlatti, B., De Souza, B. P. L., Das Graças, M. F., Da Silva, F., Batista, Fernández, J. y Rossi, Forim, M. (2012). Polymeric Nanoparticle-Based Insecticides: A Controlled Release Purpose for Agrochemicals.
- Pérez, M.G., Márquez, S.T. y Peña, L.A. (1997). Mejoramiento Genético de Hortalizas. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 380.
- Pérez-Miranda, L. (2009). El mercado nacional de chile jalapeño. Memorias Sexta convención mundial de chile. Pp. 367.
- Productores de Hortalizas. (2010). Plagas y enfermedades de chiles y pimientos. Guía de identificación y manejo. Suplemento especial. Pp. 44.
- Quispe, C. C. (2010). Nanotecnología en la agricultura. Revista de información, tecnología y sociedad. Pp. 72-73.
- Raftoyannis, Y., Radoglou, K. (2002). Physiological responses of beech and sessile oak in a natural mixed stand during a dry summer. *Annals of Botany*. Pp. 723-730.
- Rahnama, A., Poustini, K., Tavakkol-Afshari, R. y Tavakoli, A. (2010). Growth and stomatal responses of bread wheat genotypes in tolerance to salt stress. *Int. J. Biol. Life Sci.* Pp. 216-221.
- Ramesh, K., Reddy, D. (2011). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*. Pp. 219-249.
- Ramírez, H. (2005). Producción sostenible de hortalizas. Posgrado en agronomía, Universidad centro oriente occidental Lisandro Alvarado. Pp. 1-51.
- Ramos-Miros, J. J. (2002). Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos de los invernaderos del Poniente Almeriense. Editorial Universidad de Almería. Almería. Tesis Doctoral.
- Reche, M. (2008). Agua, suelo y fertirrigación de cultivos hortícolas en invernadero. Primera edición. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino España. Pp 37-75.
- Rehman, H., Aziz, T., Farooq, M., Wakeel, A., Rengel, Z. (2012). Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and soil*. Pp. 203-226.
- Roldán, M. V., Frattini, A. L., Sanctis, O. A. y Pellegri. N. S. (2000). Nanopartículas metálicas con formas diversas. Laboratorio de Materiales Cerámicos.
- Roghayyeh, S. M. S., Mehdi, T. S., Rauf, S. S. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. Pp. 112-113

- Rydenheim, L. (2007). Effects of zeolites on the growth of cucumber and tomato seedlings. Bachelor project in the Horticultural Science programme. Pp. 10.
- SAGARPA-COFUPRO. (2015). Los biofertilizantes y su uso en la agricultura. Pp. 15-18.
- SAGARPA-INIFAP. (2013). Zeolita natural: Alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporal en México.
- SAGARPA. (2012). Plan Rector del Sistema Producto Chile Seco.
- Samrat, R., Mahua, G., Amrita, M., Dipankar, C., Moumita, P., Saheli, P., Arunava, G. (2011). "Surface-modified sulfur nanoparticles: an effective antifungal agent against *Aspergillus niger* and *Fusarium oxysporum*". *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol 90, N. 2, Pp. 733-743.
- Sarathchandraa, S. U., Ghania, A., Yesteb, G. W., Burcha, G. and Coxa, N. R. (2001). Effect of nitrogen and phosphate fertilisers on microbial and nematode diversity in pasture soils. *Soil Biol. Biochem*. Pp. 953-954.
- Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J. C. y Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*. Pp. 1-21.
- Sinha, R. K. (2008). Organic farming: an economic solution for food safety and environmental. Security; *Green Farming-International J. Agric. Sci.* 1:42-49.
- Soldat, D. J. (2003). Inorganic amendments as putting green construction materials. *Soil Sci*. Pp. 1-112.
- Suquilanda, M. (2002). Producción orgánica de pimiento en la Sierra norte y Central del Ecuador. Quito. Pp. 18.
- Sheykhabglou, R., Sedghi, M., Shisvan, M. T., Sharifi, R. S. (2012). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*. Pp. 112-113.
- Shyla, K. K. y Natarajan, N. (2014). Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*. Pp. 1376-1381.
- Srinivasan C, Saraswathi R. 2010. Nano-agriculture carbon nanotubes enhance tomato seed germination and plant growth.

- Stamatakis, M. G., Koukouzas, N., Vassilatos, Kamenou, E. and Samantouros, K. (2001). The zeolites from Evros region, Northern Greece: Apotential use as cultivation substrate in hydroponics. *Acta Hortic.* Pp. 93-103.
- Tiwari D. K., Dasgupta-Schubert, N., Cendejas, L. M. V., Villegas, J., Montoya, L. C., García, S. E. B. (2014). Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Appl Nanosci.*
- Triana, C. F., Triana, E. (1992). La zeolita más de cien formas de utilización y aplicación. Ciudad de la Habana: Editorial. Ciencia y Técnica. Pp. 959.
- Tsadilas, C. D. y Argyropoulos, G. (2006). Effect of Clinoptilolite addition to soil on wheat yield and nitrogen uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.*
- Urbina, S. E., Baca, C. G., Núñez, E. R., Colinas, L. M., Tijerina, C. L. y Tirado, T. J. (2006). Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargado con K^+ , Ca^{+2} + OMg^{+2} y diferente granulometría. *Agrociencia.* Pp. 419-429.
- Urrestarazu, M. (2004). Tratado de Cultivo Sin Suelo. Madrid-España: Mundi-Prensa. Pp. 113-141.
- Ursache-Oprisan M., Focanici E., Creanga D., Caltun O. (2011). Sunflower chlorophyll levels after magnetic nanoparticle supply. *African Journal of Biotechnology.*
- Volke, H. V. H., Cruz, C. E. y Sandoval, V. M. (2010). Mezcla de materiales para la obtención de sustratos mediante programación. En: 1er. Curso Nacional de Sustratos. Colegio de Posgraduados.
- Villagarcia, H., Dervishi, E., Silva, K., Biris, A. S. y Khodakovskaya, M. V. (2012). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants.
- Yadav, A. S. y Srivastava, D. S. (2015). Application of nano-technology in weed management: A Review. *Research & Reviews: Journal of Crop Science and Technology.* Pp. 21-23.
- Zhu, H., Han, J., Xiao J. Q., and Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of Manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring.* Pp. 685-784.