

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



**Nanopartículas de cobre como promotoras de germinación de
semillas y crecimiento de plantas de *Capsicum annuum* y
*Lycopersicum esculentum***

Por:

JOSÉ ANDRÉS ARREDONDO QUIJADA

Tesis:

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2016

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

Nanopartículas de cobre como promotoras de germinación de
semillas y crecimiento de plantas de *Capsicum annum* y
Lycopersicum esculentum

Por:

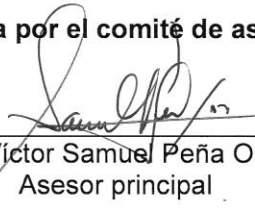
JOSE ANDRES ARREDONDO QUIJADA

Tesis:

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:



M.C. Víctor Samuel Peña Olvera
Asesor principal



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar
Asesor



Dr. Bulmaro Méndez Argüello
Asesor



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Saltillo, Coahuila México. Noviembre, 2016 **Coordinación de Ingeniería**

Dedicatoria

A mis padres, que me dieron la vida y cuidaron de ella, por su apoyo incondicional.

A ustedes por ser un ejemplo de fuerza, persistencia, humildad y amor.

A mis hermanos, por ser excelentes personas, incluyendo a mis primos con los cuales crecí, gracias por estar.

A mis amigos, a todos aquellos que siempre han estado conmigo, a los que deje lejos y a los que conocí en el camino.

A todos mis compañeros de carrera con los cuales me desarrolle y compartí momentos excelentes en clase.

A todos aquellos que han aportado a mi conocimiento

Agradecimientos

En especial al Dr. Ricardo Hugo Lira el cual me dio la oportunidad de trabajar en su equipo, en el cual aprendí muchas cosas en el transcurso del experimento.

Al Dr. Bulmaro Méndez que siempre estuvo atento a lo que se estaba realizando, por siempre estar dispuesto a colaborar.

Al MC. Samuel Peña Olvera y a la L. Q. Brenda Berenice García Berlanga por ser parte de este trabajo y dar persistencia para una buena presentación del mismo.

A todos aquellos de los cuales aprendí y gracias a ese conocimiento pude realizar un trabajo conjunto.

ÍNDICE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CONTENIDO DE CUADRO | III |
| CONTENIDO DE FIGURA | IV |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 2.1 Objetivos específicos | 4 |
| III. HIPÓTESIS | 4 |
| IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 4.1 Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)..... | 5 |
| 4.2 Pimiento (<i>Capsicum annum</i>)..... | 7 |
| 4.3 Nanotecnología (NT)..... | 8 |
| 4.4 Nanotecnología en la nutrición de plantas de importancia agronómica..... | 10 |
| 4.5 Efecto de algunas NPs en la germinación de semillas..... | 12 |
| 4.6 Nanopartículas y su efecto en el crecimiento de plantas | 14 |
| 4.7 Nanopartículas en el rendimiento de plantas | 15 |
| 4.8 Toxicidad de las nanopartículas en plantas | 18 |
| 4.9 Nanotecnología en México | 21 |
| V. MATERIALES Y MÉTODOS | 24 |
| 5.1 Localización del sitio | 24 |
| 5.2 Características climáticas del lugar | 24 |
| 5.3 Preparación de soluciones de nanopartículas de cobre y sulfato de cobre..... | 24 |
| 5.4 Laboratorio..... | 25 |
| 5.4.1 Imbibición de semillas | 25 |
| 5.4.2 Medición de variables | 25 |

| | | |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.4.3 | Análisis estadístico para semillas en laboratorio..... | 25 |
| 5.5 | Plantas en invernadero | 26 |
| 5.5.1 | Aplicación de cobre | 27 |
| 5.5.2 | Medición de variables | 27 |
| 5.5.3 | Análisis estadístico para plantas en invernadero | 27 |
| VI. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 29 |
| 6.1 | Curvas de imbibición..... | 29 |
| 6.2 | Resultados en variables fisiológicas de semillas de tomate por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de nanopartículas de cobre y micropartículas de sulfato de cobre. | 30 |
| 6.3 | Resultados en variables fisiológicas de semillas de chile ancho por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de nanopartículas de cobre y micropartículas de sulfato de cobre..... | 33 |
| 6.4 | Resultados en variables fisiológicas en plantas de tomate por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de NPs de cobre y micropartículas de sulfato de cobre..... | 36 |
| 6.5 | Resultados en variables fisiológicas en plantas de pimiento por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de NPs de cobre y micropartículas de sulfato de cobre..... | 40 |
| 6.6 | Discusiones | 44 |
| VII. | CONCLUSIÓN..... | 47 |
| VIII. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |
| IX. | ANEXOS..... | 57 |

Contenido de cuadros

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Especificaciones de los once tratamientos aplicados en semillas de tomate y chile ancho..... | 26 |
| Cuadro 2. Características de los tratamientos aplicados a plantas cultivadas en invernadero (tomate y pimiento) | 28 |
| Cuadro 3. Resultados estadísticos para semillas y plántulas de tomate. A: vigor (%), germinación (%), plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%). B: longitud de raíz y plúmula de plántulas obtenidas | 30 |
| Cuadro 4. Resultados estadísticos para semillas y plántulas de chile ancho. A: vigor (%), germinación (%), plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%). B: longitud de raíz y plúmula de plántulas obtenidas | 33 |
| Cuadro 5. Resultados estadísticos para plantas de tomate en invernadero. A: muestreo 1 (primera semana), B: muestreo 2 (segunda semana), C: muestreo 3 (tercera semana), D: muestreo 4 (cuarta semana) | 36 |
| Cuadro 6. Muestreo final en plantas de tomate. A: muestreo final en plantas frescas, B: muestreo final de pesos secos | 38 |
| Cuadro 7. Resultados estadísticos para plantas de pimiento en invernadero. A: muestreo 1 (primera semana), B: muestreo 2 (segunda semana), C: muestreo 3 (tercera semana), D: muestreo 4 (cuarta semana) | 40 |
| Cuadro 8. Muestreo final en plantas de pimiento. A: muestreo final en plantas frescas, B: muestreo final de pesos secos | 42 |

CONTENIDO DE FIGURA

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Canal comercial del tomate o jitomate en México (SAGARPA, 2010) | 6 |
| Figura 2. Microfotografía obtenida con un microscopio de escaneo de electrones (SEM). Las nanopartículas de cobre reportaron un tamaño entre 40 y 60 nanómetros (Ghorbani et al., 2015). | 19 |
| Figura 3. Nanopartículas de cobre con tamaño de 70 nm. (US Research Nanomaterials, Inc.)..... | 20 |
| Figura 4. Curvas de imbibición promedio de semillas de tomate y chile ancho. | 29 |
| Figura 5. Resultados que muestran diferencias estadísticas para semillas y plántulas de tomate. A: vigor (%), B: longitud de radícula (cm), C: longitud de plúmula (cm)..... | 32 |
| Figura 6. Resultados que muestran diferencias estadísticas para semillas y plántulas de chile. | 35 |
| Figura 7 Resultados que muestran diferencias estadísticas en plantas de tomate. A: área foliar (cm ²), B: longitud de raíz (cm), C: peso fresco de tallo (g). | 39 |
| Figura 8. Resultados que muestran diferencias estadísticas en plantas de tomate. A: altura (cm), B: peso seco de tallo (g), C: peso seco de hojas (g). | 43 |

RESUMEN

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) en Saltillo, Coahuila, México, durante el ciclo primavera-verano. La palabra nanotecnología (NT) se usa extensivamente para definir las ciencias y técnicas que se aplican al nivel de nanoescala, esto es, medidas extremadamente pequeñas, “nanos” que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos. La agricultura es considerada como la segunda área de aplicación nanotecnológica, después del mercado energético. Los proyectos actualmente en desarrollo se basan en la agricultura sin pérdidas, los principales componentes que se adicionaran en forma óptima y controlada son los fertilizantes, plaguicidas y agua. Con el fin de observar el efecto promotor de las nanopartículas de cobre (NPsCu) en algunas plantas *Solanaceae*, se llevó un experimento en dos etapas. La primera consistió en la aplicación de bajos niveles de NPsCu en semillas de tomate y chile ancho. Las semillas se embebieron de acuerdo a las curvas de imbibición promedio obtenidas, en soluciones de agua destilada con diferentes concentraciones de NPsCu y Sulfato de cobre para su posterior traslado a papel Anchor. Las concentraciones fueron de 0.5, 1, 5, 10, 50 ppm de NPs de Cu comparándolas con sulfato de Cu en las mismas concentraciones, además de un control. La segunda etapa consistió en la aplicación de NPsCu y micropartículas de sulfato de cobre en plantas de tomate y pimiento. Se hicieron dos aplicaciones a concentraciones de 25 y 50 ppm de NPsCu (la aplicación de NPs fue a través de dos vías: foliar y directo a raíz) y Sulfato de Cu, además de un control. Las plantas se establecieron en un sistema hidropónico con un sustrato combinado de peat moss (70%) y perlita (30%) dentro de un invernadero de mediana tecnología; las plantas fueron evaluadas durante la etapa vegetativa. Para el análisis estadístico se aplicaron pruebas Tukey ($p < 0.05$), el programa utilizado fue el JMP-SAS. Los resultados muestran que las semillas de tomate y chile ancho presentaron las medias más altas en variables de vigor (%), longitud de radícula (cm) y longitud de plúmula (cm) con la aplicación de NPs de Cu en comparación al testigo y la aplicación de sulfato de Cu, además de mostrar tendencias a una mejor germinación con la

aplicación de las NPs. Para plantas en invernadero se observaron diferencias significativas en diversas variables al final del experimento. El efecto del sulfato de Cu en esta etapa muestra las medias más altas, aunque no se observó diferencias significativas en todas las variables; mientras que la comparación de los métodos de aplicación de las NPs nos muestra que las medias más altas se obtienen con la aplicación directa a raíz. La aplicación de NPs_{Cu} y micropartículas de sulfato de Cu tiene un efecto promotor en las plantas (*Solanaceae*) en comparación con el control, obteniéndose las más altas medias en variables de germinación con la aplicación de bajas dosis de NPs_{Cu}, mientras que en etapa vegetativa las micropartículas de sulfato de Cu muestran una tendencia a mayores medias para las diferentes variables estudiadas.

Palabras clave: nanopartículas de cobre, sulfato de cobre, plantas *Solanaceae*, nutrición, crecimiento.

I. INTRODUCCIÓN

La familia de plantas *Solanaceae* ha hecho importantes aportaciones culturales, sociales, económicas y políticas a la vida del hombre a través de la historia. En la actualidad varias de las especies de *Solanaceae* domesticadas tienen un papel importante en la dieta universal como plantas del sustento y aportadora de vitaminas y minerales. De hecho, la papa y el tomate actualmente son consideradas como las hortalizas más importantes en los mercados mundiales (Towell, 2015).

México destaca como una de los principales exportadores mundiales de productos agroalimentarios y pesqueros, y además se ha convertido en un proveedor importante de los mercados mundiales de un gran número de productos frescos y procesados. La gran dinámica de las exportaciones de cerveza ha llevado al país a ocupar el segundo lugar mundial en este rubro. Le siguen en orden de importancia las ventas de tomates, bovinos vivos, camarones, pimientos, pepinos y pepinillos, chile “bell”, artículos de confitería, café, cebollas, uvas y aguacates. Para la economía agrícola del país, el sector de las hortalizas presenta una gran importancia por su contribución en la generación de empleo en el campo.

En México, la producción de hortalizas en invernadero se localiza en zonas desérticas y en el centro del país, cultivándose principalmente tomate, pimiento y pepino, donde los productores de pimiento morrón (chile dulce, chile bell, pimentón o bell pepper) están en competencia internacional. Los cambios en los estilos de vida y el incremento en la necesidad de obtener nuevos hábitos de consumo, ha ocasionado un incremento en el consumo de frutas y vegetales frescos. En la actualidad estos productos gozan de una gran aceptación por parte de los consumidores que buscan en gran medida aspectos benéficos para la salud. Las nuevas necesidades que presenta este grupo de consumidores demandan productos de buena calidad y buen sabor (Lucero y Sánchez, 2012).

La seguridad alimentaria es un reto debido a la limitada disponibilidad de recursos para la creciente población. Varios esfuerzos están comenzando a

practicarse por gobiernos, organismos e investigadores para mitigar la demanda y el déficit en el suministro de alimentos (Dubey y Mailapalli, 2016). La nanotecnología (NT) es la ciencia de la manipulación de materiales a nano escala. Entre los últimos avances tecnológicos, la NT ocupa una posición central. Tiene muchas aplicaciones en todas las etapas de producción, tratamiento, almacenamiento, empaçado y transporte de productos agrícolas.

El reducido uso de herbicidas, pesticidas y fertilizantes con el incremento en la eficiencia, liberación controlada y liberación dirigida conducirán a la agricultura de precisión. La agricultura moderna necesita de espacio en nuestra época ya que la agricultura convencional no será viable en un futuro próximo para abastecer las necesidades de una población en incremento, el agotamiento de recursos y la reducción del paisaje. Pero la aplicación de algunos nanomateriales (NMs) en el sector agrícola tiene que ser evaluado para poder lograr la aceptación del público (Ali *et al.*, 2014).

La agricultura es considerada como la segunda área de aplicación nanotecnológica, después del mercado del mercado energético. Los proyectos actualmente en desarrollo se basan en la agricultura sin pérdidas, los principales componentes que se adicionaran en forma óptima y controlada son los fertilizantes, plaguicidas y agua. La NT se puede combinar con métodos convencionales y proponer opciones promisorias para la remediación de suelos contaminados con metales pesados vía su remoción o estabilización. Por ejemplo, el uso de partículas de hierro granular valencia cero y sus nanopartículas (NPs) aglomeradas o estabilizadas, han sido exitosas para la reducción de Cr(VI) a Cr(III) (altamente toxicos) en estudios de campo y laboratorio (Carrillo-González y González-Chávez, 2009).

El plan de desarrollo nacional de México 2007-2012 considera a la NT como sector estratégico y como tecnología precursora, ya que tienen una fuerte incidencia sobre el desarrollo de muchas actividades productivas, y porque se prevé que en el futuro su utilización será determinada para el desarrollo de muchas ramas de los

sectores agropecuarios, industrial y de servicios; y por los tanto, para la productividad y competitividad del país.

Como resultado de la elaboración del estudio “Diagnóstico y Prospectiva de la Nanotecnología en México”, se identificaron 56 instituciones que en México desarrollan actividades de investigación y/o docencia relacionadas con la NT y el desarrollo de nuevos materiales, las cuales albergan a 449 investigadores relacionados con la temática, de los cuales 29% pertenecen a centros CONACYT; 18% a la Universidad Autónoma de México; 15% al instituto Mexicano del Petróleo; 8% al Instituto Politécnico Nacional, y el 30% restante a otras 20 instituciones ubicadas en distintos estados del país (Red Global MX, 2016).

II. OBJETIVO GENERAL

Estudiar los efectos causados por la aplicación de nanopartículas de cobre (NPs Cu) en semillas y plantas de tomate y chile, en especial, el efecto potencial como promotoras o inhibidoras de respuestas fisiológicas.

2.1 Objetivos específicos

1. Analizar el efecto de dichas NPs en diversas variables relacionadas con la germinación de semillas como son: % de germinación; índice de vigor; longitud de radícula y plúmula.
2. Determinar el efecto de las concentraciones de NPs_{Cu} en las siguientes variables: altura de plantas, diámetro de tallo, número de hojas; área foliar, así como partición de biomasa en diferentes etapas fenológicas de las plantas de chile y tomate.

III. HIPÓTESIS

La aplicación mediante imbibición de NPs_{Cu} en dosis bajas, estimula la germinación de semillas, y las aplicaciones foliares y directas a la raíz en diferentes dosis afectarán positiva o negativamente el crecimiento de plantas de pimiento y tomate.

IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Tomate (*Lycopersicum esculentum*)

Aunque el tomate y la historia primitiva de su domesticación no se conocen con claridad, el peso de la evidencia sugiere que México fue probablemente el centro de origen. Hay tres aspectos de su aparición razonablemente ciertos: el tomate cultivado se originó en el nuevo mundo donde alcanzó un grado bastante avanzado de domesticación antes de ser llevado a Europa y Asia; su más probable antecesor es el tomate cereza silvestre *Lycopersicum esculentum* var. *Cerasiforme*, encontrado primeramente en toda la América tropical y subtropical, y luego en los trópicos de Asia y África (Villareal, 1982). El tomate es una planta herbácea durante sus fases tempranas, ya que en los últimos estadios de crecimiento se hace algo leñoso. No obstante el cultivo necesita tutores porque la zona del cuello es muy débil (Baudoin, 2002).

Sin duda alguna, el tomate (*L. esculentum*) es la aportación vegetal de México más extendida en el orbe. En la Figura 1 se observa el extenso canal comercial del tomate, el grado de aceptación que tiene en las diversas culturas del mundo se evidencia por el hecho de que es el segundo producto hortícola en el consumo mundial. Su trascendencia en el contexto económico del país reside en su importante aportación de divisas y en la generación de empleos en todas y cada una de las fases de la cadena agroalimentaria. Como consecuencia de la incorporación de México al Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN, mejor conocido en nuestro país como TLC), el nuevo panorama impone estrategias que deben permitir la permanencia y el crecimiento de la producción agrícola nacional en un mercado de nuevas exigencias para nuestros productores (COFUPRO, 2003).

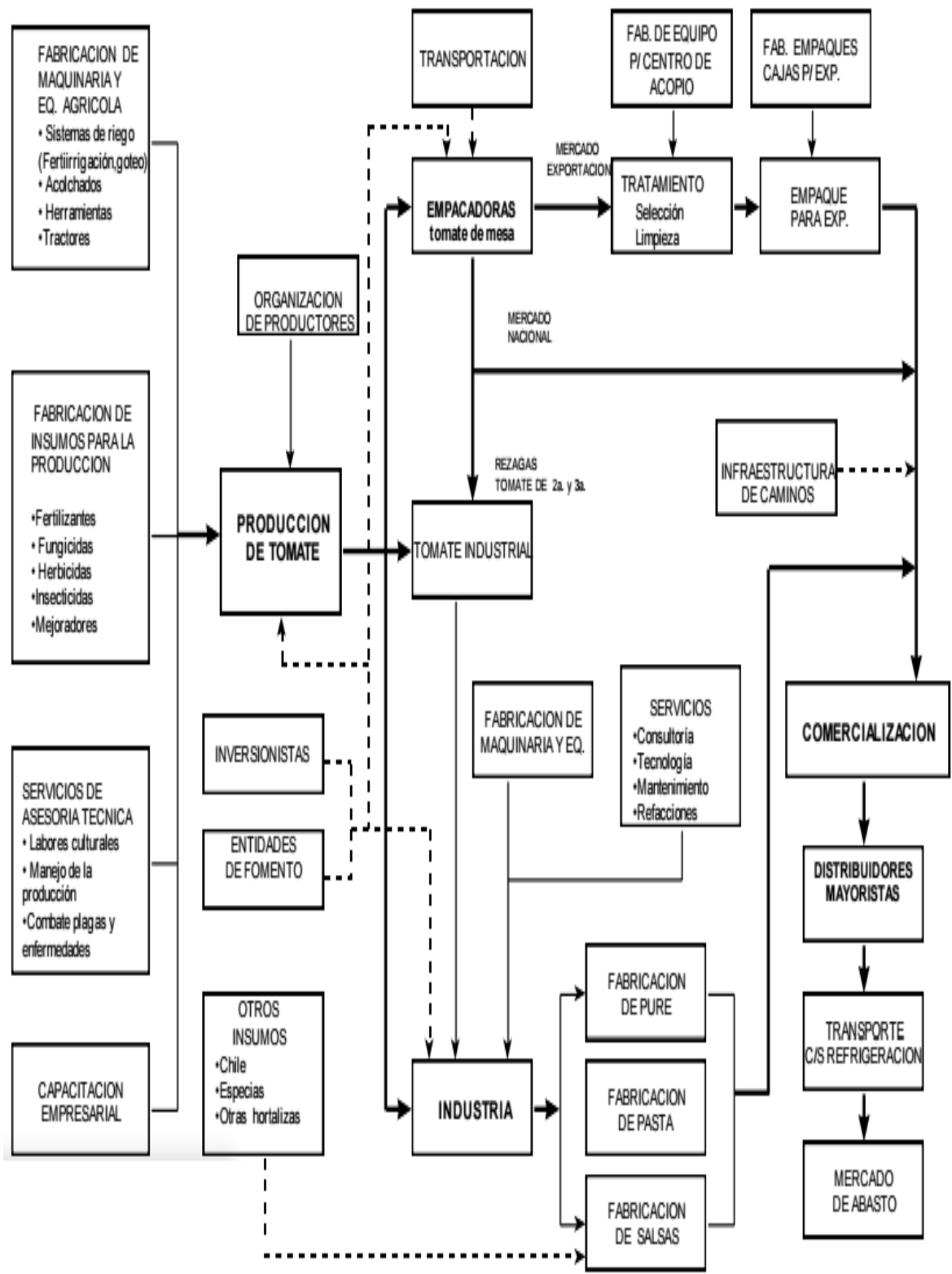


Figura 1. Canal comercial del tomate o jitomate en México (SAGARPA, 2010)

En los últimos años, la producción tomatera ha aumentado en alrededor de 50 por ciento, impulsada por una mayor superficie agrícola con sistemas de agricultura protegida. En todos los meses del año se tiene disponibilidad de tomate. De acuerdo con estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), durante 2014 la producción anual de tomate fue de alrededor de 2.8 millones de toneladas, en tanto que datos del Sistema Producto indican que las exportaciones ascendieron a 20 mil millones de pesos. La mayoría de la producción se exporta a Estados Unidos, Canadá y algunos países europeos, con base en los altos estándares de calidad e inocuidad que han alcanzado los productores mexicanos, así como en el reconocido estatus sanitario del país (Secretaría de Relaciones Exteriores, 2015).

4.2 Pimiento (*Capsicum annum*)

El pimiento pertenece al género *Capsicum* de la familia de las Solanáceas. Los *Capsicum* cultivados pertenecen a las cuatro especies siguientes: *C. annum*, *C. frutescens*, *C. pendulum Willd* y *C. pubescens* (Baudoin, 2002).

El *Capsicum* en México es conocido como chile y representa una tradición cultural, ya que se considera como una de las primeras plantas en ser cultivadas en Mesoamérica, en especial el *C. annum* que se domesticó desde la época prehispánica, y es común observarlo en mesas de las diferentes clases sociales de este país. Casi todos los chiles cultivados en México pertenecen a la especie *annuum*, que es una planta anual, pero que sin embargo, suele crecer como perenne en zonas tropicales.

La domesticación de esta variedad ocurrió en Mesoamérica, con una evolución probable de la variedad *glabriusculum/aviculare*. Es el grupo de mayor importancia en el mundo y de distribución geográfica más amplia. Desde 1993 la producción mundial de chiles ha tenido un incremento del 48% de la superficie y duplicado los volúmenes de producción. Este aumento en la producción de chiles se debe a la creciente demanda del producto en sus diferentes presentaciones (fresco, seco y procesado), tanto para consumo directo como para usos industriales, que

incluyen desde la producción de polvos, salsas y condimentos, hasta uso farmacéutico y en la elaboración de jabones y cosméticos (FAO, 2010).

Con una producción de 2.7 millones de toneladas, el país ocupa el segundo lugar en producción de chile verde, actividad en la que participan más de 12 mil productores. México es líder en exportación de chile, con un comercio de 845 mil toneladas de este producto, lo que generó divisas por alrededor de 560 millones de dólares en 2014 (SAGARPA, 2015).

La importancia del cultivo de chile en México es evidente tanto por la amplia distribución como por su amplio consumo en el país. Este fruto se siembra comercialmente desde el nivel del mar, en las regiones tropicales de la costa, hasta los 2,500 metros de altura en las regiones templadas de la Mesa Central. Es además de un amplio rango ambiental que permite su producción durante todo el año, con lo que se satisface la demanda del producto en las principales ciudades. La superficie sembrada nacional registrada al 2009 fluctuó alrededor de las 144,000 hectáreas, de las cuales casi el 85% cuenta con sistemas de riego (Comité Estatal Sistema Producto Chile, 2015).

4.3 Nanotecnología (NT)

La NT es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedad de la a materia. La palabra nanotecnología se usa extensivamente para definir las ciencias y técnicas que se aplican al nivel de nanoescala, esto es, medidas extremadamente pequeñas, “nanos” que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos.

En síntesis conduciría a la posibilidad de fabricar materiales y máquinas a partir del reordenamiento de átomos y moléculas. Un nanómetro equivale en escala a la billonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$). Cuando se manipula la materia a la escala tan minúscula de átomos y moléculas, demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Por lo tanto, científicos utilizan la NT para crear materiales,

aparatos y sistemas novedosos y poco costosos con propiedades únicas (Castillo, 2012).

El mesoespacio es un ámbito tridimensional que se desarrolla entre 1 y 100 nanómetros, en donde ocurren hechos regidos por las leyes cuánticas y que, por otra parte, es el origen de propiedades físico-químicas inéditas. En el ámbito macroscópico predomina el efecto colectivo de millones de átomos. Al aislar objetos con dimensiones de 1 y 100 nm constituidos por algunos átomos, se ponen en evidencia comportamientos particulares, aumento de las superficies de intercambio (reactividad creciente), resistencia mecánica, funciones ópticas, electromagnéticas y térmicas, producidas por el comportamiento cuántico. Predomina en este ámbito la organización espacial de los átomos, más que la naturaleza química del material (Castagnino, 2006).

La NT se utilizará para manipular semillas y modificar sus características, teóricamente sin modificar los genes hereditarios. La NT será usada además para reformular al nivel de átomos los insumos que se utilizan en la parcela, incluidos fertilizantes, herbicidas, insecticidas y pesticidas. La NT en el entorno de la agricultura sustentable se considera que también se utilizará para producir moléculas con propiedades antimicrobiales y que eventualmente pudiesen sustituir a agroquímicos sintéticos de alto impacto ambiental. Además, debido a que los nanoproductos contienen una muy pequeña cantidad del ingrediente activo, en comparación con los agroquímicos tradicionales, se considera que eso ayudará a promover una agricultura de menor impacto ambiental (Lira-Saldivar y Méndez-Arguello, (2016).

Estos materiales podrán ser empleados para fabricar comida que pueda comercializarse por sus propiedades saludables, y para producir alimentos en empaques inteligentes con el fin de alargar su fecha de caducidad, permitiendo así que se transporten a mayores distancias y se almacenen por más tiempo. La nano vigilancia permitirá realizar un seguimiento de los alimentos desde el campo, pasando por la cadena de procesamiento, hasta los supermercados e incluso más allá (Lira-Saldívar *et al.*, 2014).

4.4 Nanotecnología en la nutrición de plantas de importancia agronómica.

La obtención de beneficios para la sociedad por actividades de investigación aplicadas se ven reflejadas en la creación de productos que después llegan a las personas y brindan soluciones a sus problemas. La NT se convierte en una importante oportunidad para manipular la materia e innovar, resultados que se están observando en diferentes lugares del mundo (Pastrana *et al.*, 2012). La NT es considerada en la Unión Europea como uno de los descubrimientos tecnológicos que contribuye a la competitividad sustentable y crecimiento en varios sectores industriales.

A pesar de las numerosas ventajas de la NT y el creciente aumento de publicaciones y patentes, la aplicación de estos productos no tiene un amplio mercado. Varios factores podrían explicar la escasez comercial; por un lado, la NT en la agricultura no ha demostrado tener un retorno económico en comparación con la inversión inicial, y por otro lado se debe contrarrestar la incertidumbre que se tiene de los productos que ya están en el mercado y que afectan la percepción del público. Sin embargo la opinión del público no ha sido negativa y pueden entrar en la aceptación del mercado, especialmente si la relación costo: beneficio es a favor del productor (Parisi *et al.*, 2015).

La investigación sobre la aplicación de la NT para el uso en la agricultura ha comenzado a incrementar desde la década pasada con un particular interés en nuevos nanoagroquímicos, también llamados nanopesticidas (NPes) y nanofertilizantes (NFer), siendo para algunos autores el inicio de una “nueva revolución verde”, orientada a realizar más prácticas sustentables en la agricultura moderna. Esta perspectiva integra factores diversos como la ciencia, regulación, publicidad y puntos de vista; además de hacer evaluaciones más críticas de sus impactos (Kah, 2015). La fertilización tiene un papel importante en la producción de alimentos, teniendo un rango de 35 a 40% de importancia en la producción agrícola.

Para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y superar los problemas crónicos de eutrofización los NFer son la mejor alternativa. Intentos de síntesis de

fertilizantes a escala nanométrica han sido hechos particularmente con un micronutriente metálico como el zinc, para regular la liberación de nutrientes dependiendo los requerimientos de los cultivos (Shivakumar *et al.*, 2015).

En el trabajo reciente de Kizhaeral *et al.*, (2015), se menciona que los fertilizantes son esenciales para aumentar la producción de cultivos, pero se destaca que la eficiencia de los fertilizantes convencionales apenas exceden los valores de 30-35% para el N; de 18-20% para el P y de 35-40% para el K. Enfoques químicos y físicos son tomados en cuenta para la producción de nanomateriales, y algunos de estos son cargados con nutrientes catiónicos como NH_4^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y aniónicos como NO_3^- , PO_4^- y SO_4^- .

Avances en la NT han mejorado las formas para la producción de NPs metálicas fisiológicamente importantes, las cuales son usadas en formulaciones de fertilizantes para mejorar el consumo de las células en las plantas y minimizar la pérdida de nutrientes. Estas podrían liberar efectivamente sus ingredientes activos en respuesta a disparadores ambientales y demandas biológicas. En recientes investigaciones de laboratorio se ha reportado que los NFe pueden incrementar la productividad de los cultivos aumentando la tasa de germinación, crecimiento de plántulas, actividad fotosintética, metabolismo de nitrógeno, y síntesis de carbohidratos y proteínas. Sin embargo, es una tecnología nueva, la ética y las cuestiones de seguridad que rodean el uso de NPs en la producción de alimentos provenientes de las plantas, deberían ser más ampliamente evaluadas antes de adaptar el uso de los llamados NFe en los campos agrícolas (Solanki *et al.*, 2015).

La NT tiene un gran impacto en el desarrollo rural, la biología sintética puede revolucionar la producción de alimentos en comparación con los métodos tradicionales de la agricultura. Es necesaria la creación de estándares internacionales y reducir las diferencias en evaluación de nanotecnologías y riesgos en la práctica. La NT puede tener un riesgo significativo para la producción de alimentos, distribución de los mismos y cuidado de los sistemas que son poco considerados pero muy importantes para las ciudades, requiriendo grandes

esfuerzos de investigación para evitar daños que se puedan generar con la aceleración en el desarrollo de estas tecnologías (Shivakumar *et al.*, 2015).

4.5 Efecto de algunas NPs en la germinación de semillas

Actualmente la NT es considerada una importante herramienta para incrementar la producción de cultivos y satisfacer la demanda de alimentos para satisfacer la creciente población humana. Para satisfacer esta creciente demanda, algunas investigaciones tienen un enfoque tecnológico de producción eficiente y ecoamigable, basado en tecnologías innovadoras para incrementar el vigor de semillas, plántulas y el establecimiento de plantas en sistemas de producción en condiciones de campo abierto o de agricultura protegida. La germinación es un importante fenómeno en la agricultura moderna, ya que es una fase de vida en las plantas que garantiza su supervivencia (Siddiqui y Al-Whaibi, 2014).

Los resultados de El-Temsah y Joner (2010) evaluaron aplicaciones de NPs de Fe (nZVI) y tres tipos de NPs de plata (NPSAg) con tamaños de 1 a 20 nm, en la germinación de semillas y en la biodisponibilidad en plantas de zacate *ryegrass* (*Lolium perenne* L., cv. Tove); cebada (*Hordeum vulgare* L., cv. Annabell) y lino (*Linum usitatissimum* L., cv. Electra). Los resultados expresaron que el porcentaje de germinación en las semillas de las tres especies no fueron inhibidas con concentraciones menores de 250 mg L^{-1} en cuanto a la aplicación de nZVI, mientras que la aplicación de NPSAg en la germinación de semillas de cebada y *ryegrass* las afectaron negativamente, teniendo una respuesta diferente en cada tipo de NP utilizada, no siendo así para el lino, el cual germinó en su totalidad sin importar el tipo de NPSAg usada.

Estas mismas NPs cero-valentes de hierro cargadas de fosfatos fueron utilizadas en un sistema hidropónico con espinaca (*Spinacia oleracea*) y algas (*Selenastrum capricornutum*), con la finalidad de evaluar la biodisponibilidad de fosfatos en el medio. La concentración de algas aumentó hasta 6.7 veces cuando la única fuente de fosfatos fueron esas NPs cargadas; mientras que en espinacas la biomasa aumentó de 2.2 a 4 veces en presencia de esas NPs; el trabajo también

indica que hay un incremento de 21 veces el contenido de hierro en las raíces, hojas y tallos respectivamente (Almeelbi y Bezbaruah, 2014).

Resultados revelan que la aplicación de NPs de TiO_2 y ZnO en tomate afecta la fenología de la planta, la calidad de la fruta y rendimiento de biomasa, cualidades nutricionales y contenido de clorofila. Independientemente del tipo de NPs utilizadas, una concentración de 250 mg kg^{-1} de TiO_2 y ZnO , promueve el crecimiento de la planta, longitud de raíces y la biomasa total, mientras que el contenido de licopeno y rendimiento de fruta tuvieron los máximos resultados con concentraciones de 100 mg kg^{-1} (Raliya *et al.*, 2015). Las NPs ZnO en cantidades de 0, 2, 4, 8, 10 y 14 ppm junto con fósforo y dióxido de titanio, fueron aplicadas a semillas de *S. Lycopersicum* variedad Patharkuchi. Los resultados consignan que en comparación con el control, la aplicación de estas NPs mejoró de forma significativa la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas durante la mayor parte de los tratamientos (Das *et al.*, 2015).

El incremento en el uso de la ingeniería de NMs con nuevas propiedades en comparación con sus contrapartes de mayor tamaño, ha generado la necesidad de definir los comportamientos e impactos en el ambiente. La alta relación superficie/volumen de los NMs resulta en una alta reactividad, además de ser dinámicos fisicoquímicamente en el medio ambiente. Muchas transformaciones como la reacción con biomacromoléculas, reacciones redox, agregación y disolución, pueden ocurrir en el ambiente y los sistemas biológicos. En el corto y largo plazo, esas transformaciones y otras alterarán el destino, transporte y toxicidad de los NMs en el ambiente y los seres vivos (Lowry *et al.*, 2012).

En la ciencia de la medicina se está estudiando una nanopartícula de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) por su alta coercitividad, anisotropía y alta magnetostricción, siendo estas propiedades deseables en una imagen de resonancia magnética, liberación de medicamentos y marcado de células. Plantas de tomate en un sistema hidropónico al cual se le suministraron NPs de ferrita de cobalto en un rango de 0 a 1000 mg L^{-1} , demostraron que estas no afectan la germinación y crecimiento de plantas. La absorción de hierro y cobalto aumentó en la planta con el suministro de

estas NPs, además encontraron una mejor absorción de magnesio a 125 mg L^{-1} de concentración de CoFe_2O_4 , la cual decreció cuando la concentración de NPs aumentó. Similares resultados fueron observados en la absorción de calcio, la cual obtuvo una diferencia significativa en la misma concentración de CoFe_2O_4 (López-Moreno *et al.*, 2016).

4.6 Nanopartículas y su efecto en el crecimiento de plantas

Los efectos morfológicos positivos de los NMs incluye mejor porcentaje de germinación, mayor longitud y radio de brotes y raíces, además de incrementar la biomasa de plántulas y mejoramiento de los parámetros fisiológicos como actividad fotosintética y metabolismo de N en muchos cultivos (Agrawal y Rathore, 2014).

El hierro (Fe) es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Está involucrado en la formación de clorofila y su deficiencia puede causar un desorden conocido como clorosis. Las NPs Fe han comenzado a ser investigadas como nanofertilizante de plantas con un enfoque prometedor. Recientemente se realizó un experimento en un sistema hidropónico usando una solución Hoagland con 100 ppm de NPs de óxido de hierro que se añadieron para evaluar el potencial beneficio, en comparación con el quelato de hierro EDTA. Los datos generados muestran que las raíces de jengibre absorben NPs de óxido de hierro, además de mostrar un incremento en los niveles de proteína y contenido de hierro en el rizoma. Por lo tanto, se sugiere que las NPs de óxido de hierro son un efectivo suplemento para el control de la clorosis férrica (Siva y Benita, 2016).

Experimentos con un nanoquelato de hierro en combinación con un fitorregulador llamado Cycocel en plantas de noche buena (*Euphorbia pulcherrima*), se observó que se vieron beneficiadas en altura en comparación al testigo con la aplicación del nanoquelato a una concentración de 4.5 mg L^{-1} , siendo contrarios los resultados con concentraciones de 1.8 mg L^{-1} en combinación con 1000 mg L^{-1} del fitorregulador, obteniéndose alturas menores en comparación al testigo. En cuanto a la concentración de Fe en la hoja se mostraron los mejores resultados con la aplicación de 500 mg L^{-1} de Cycocel sin el nanoquelato (Kaviani *et al.*, 2016).

Tratamientos con concentraciones de 2 ppm de nanoquelato de calcio y 6 ppm de nanoquelato de K muestran que hay un mayor peso en 1000 semillas de albahaca en comparación al testigo ($P < 0.05$). En este mismo experimento se muestra un incremento en la masa seca, mayor área foliar, índice de cosecha, rendimiento de grano, rendimiento biológico, porcentaje de calcio, porcentaje de potasio y contenido de clorofila en las plantas (Ghahremani *et al.*, 2014). En otro experimento con albahaca fueron tratadas NPs de silicio en comparación con un testigo y un fertilizante de silicio convencional además de diferentes niveles de estrés salino (1, 3 y 6 ds/m), demostrando que hay mayor cantidad de clorofila en plantas tratadas con estas NPS, mejores niveles de prolina y la reducción de efectos negativos causados por la salinidad del medio (Kalteh *et al.*, 2014).

En plantas de *Pennisetum americanum*, Tarafdar *et al.* (2014) aplicaron NPsZn con tamaño en el rango de 15-25 nm; los autores encontraron con respecto al tratamiento control, un incremento significativo en la longitud de brotes (15.1%), longitud de raíces (4.2%), área de raíz (24.2%), contenido de clorofila (24.4%), proteína soluble en hoja (38.7%), biomasa seca (12.5%), actividad de enzimas (76.9%), fosfato alcalino (61.7%), fitasa (322.2%), y deshidrogenasa (21%)

Otras NPs obtenidas de cenizas de caucho, fueron utilizadas como fertilizantes de zinc en plantas de pepino, en las cuales se evaluaron los destinos y efectos que tienen las NPs sobre estas. Las NPs llamadas RANPs fueron comparadas con $ZnSO_4$, los resultados mostraron que las plantas de pepino tuvieron mayor biomasa en raíz, brotes más grandes y mayor acumulación de Zn en la planta con la aplicación de las NPs, a pesar de que se verificó una mayor fitotoxicidad con aplicaciones de $ZnSO_4$ en las plantas (Moghaddasi *et al.*, 2015)

4.7 Nanopartículas en el rendimiento de plantas

Algunas sales solubles de fosfato usadas muy comúnmente en la agricultura como fertilizantes de fósforo provocan eutrofización debido a su acumulación en las aguas superficiales y subterráneas, mientras que los fosfatos sólidos son menos efectivos supliendo el nutriente. Liu y Lal, (2014), sintetizaron una nanopartícula de

apatita capaz de suministrar fósforo a la planta, demostrando que su aplicación en plantas de soya (*Glycine max*) incrementó la tasa de crecimiento y el rendimiento de semillas en 32.6% y 20.4% respectivamente, comparado con otro tratamiento en el cual se aplicó fósforo en forma de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. La producción de biomasa aérea aumentó en 18.2% y 41.2% en la parte subterránea.

En un sistema de producción agrícola la aplicación de fertilizantes tiene que ser amigable con el medio ambiente y sustentable. Esto se convierte en mayor importancia comercial para plantas medicinales. Estudios con *Nigella sativa* L., en tratamientos del fertilizante nanopharmax y ácidos húmicos aplicados de manera foliar en tres etapas de crecimiento de la planta, muestran que la aplicación de esos productos pueden incrementar el rendimiento y componentes del rendimiento de *N. sativa*. Tratamientos combinados en varios niveles tienen efectos significativos en el peso y rendimiento de semilla, rendimiento biológico y mayor índice de cosecha respectivamente (Safae *et al.*, 2014).

Microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopia de energía dispersa (EDS) muestran que las NPs de óxido de cobre fueron transportadas desde raíces a los brotes aéreos vía xilema en plantas de maíz (*Zea mays* L.). Estos experimentos hechos con raíces también muestran que las NPs podrían trasladarse desde los brotes hacia las raíces vía floema, reduciéndose de Cu (II) a Cu (I) (Wang *et al.*, 2012). Pocos estudios se han enfocado en el impacto de NPs en la calidad de la fruta y suplementos alimenticios. Resultados recientes muestran que algunos azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y ácidos grasos en frutos de pepino incrementaron o decrecieron por la aplicación de diferentes concentraciones de NPs Cu en suelo, además de cambiar la concentración de varios metabolitos como metilnicotinamida (MNA), trigonelina, imidazol, y quinolinolato (Zhao *et al.*, 2016).

La NT asociada a macronutrientes también está siendo evaluada, según estudios de Ajirloo *et al.* (2015), plantas de tomate (*L. esculentum*) muestran mayor altura y diámetro de vástago en aplicaciones de 400 kg por ha^{-1} de nanofertilizante de potasio, mientras que a concentraciones de 300 kg ha^{-1} de este nanofertilizante, se tiene la más alta cantidad de frutas por planta, peso y diámetro de frutos, así

como mayor rendimiento en comparación con los otros tratamientos. Abdel-Aziz *et al.* (2016) muestran que tratamientos aplicados en plantas de trigo en un suelo arenoso con NPs de quitosano-NPK, se induce un incremento significativo en el índice de cosecha, índice de cultivos e índice de movilización en variables del rendimiento de trigo. El ciclo de vida del nanofertilizante en la planta de trigo, comparado con un fertilizante normal, fue más corto en una proporción de 23.5% (130 días en comparación a 170 días). La nanonutrición es una interesante área de investigación, proveyendo a los cultivos de nutrientes en escalas nanométricas. Usando esta tecnología se puede incrementar la eficiencia de macro y micronutrientes en la planta (Ditta y Arshad, 2016).

Generalmente los NFe afectan el estatus de los macronutrientes y micronutrientes en diferentes tratamientos de riego. La aplicación de nano-P muestra una mejor absorción de nutrientes por la planta en diferentes condiciones de riego. Los resultados indican que plantas de algodón con aplicaciones de 0.5 g L^{-1} promueven la absorción de nutrientes en etapas de la floración (Hussien *et al.*, 2015).

Muchas NPs han sido desarrolladas por su potencial encapsulador de micronutrientes e incrementar su funcionalidad, estabilidad y biodisponibilidad. Es importante evaluar el impacto de matrices alimentarias complejas en la estabilidad y biodisponibilidad de los micronutrientes encapsulados en los sistemas de entrega, pero también el efecto de los sistemas de entrega en lo físico, químico y las propiedades sensoriales de los productos alimenticios (Joye *et al.*, 2014).

Otro experimento con nanoquelatos de hierro aplicados de manera foliar muestra la reacción de tres especies de trigo sometidas a diferentes dosis del nanoquelato, evaluándose el número de espigas por m^2 y número de granos por espiga, entre otros. Los resultados expuestos muestran que uno de los cultivares llamado Azar2, se ve beneficiado a la aplicación de nanoquelato a concentraciones de 3.5 Kg en 1000 L de agua. En cuanto a los parámetros de rendimiento de grano (Kg ha^{-1}), rendimiento biológico (Kg ha^{-1}) e índice de cosecha (%), el cultivar de trigo

llamado Zagro obtuvo buenos resultados en comparación con el testigo, estando los nanoquelatos a una concentración de 2.5 Kg en 1000 L de agua. (Rezaeei *et al.*, 2014),

4.8 Toxicidad de las nanopartículas en plantas

La interacción entre los NMs y las plantas es de gran preocupación, ya que las plantas conviven cercanamente con suelo, agua y la atmósfera, además de constituir una de las rutas principales de exposición para muchas especies (Miralles *et al.*, 2012). Diversas cuestiones éticas están asociadas a la NT en los alimentos, ligados a los conceptos éticos de autonomía, beneficios, mal uso y justicia (garantizar la seguridad, evaluación efectiva de riesgos, transparencia, beneficios para el consumidor, bienestar animal y protección al medio ambiente). Instrumentos legislativos diseñados originalmente para otros propósitos están siendo usados en las aplicaciones de los NMs, siendo estos procedimientos no específicos para los NMs en la agroindustria (Coles y Frewer, 2013). Las preocupaciones se han centrado en los efectos adversos en sistemas biológicos y el ambiente tales como la toxicidad generada por radicales que conducen a la peroxidación de lípidos y daños en el ADN, dentro de este escenario, hay una necesidad de predecir los efectos ambientales de las NPs en un futuro cercano (Agrawal y Rathore, 2014).

El nivel de nanotoxicidad en suelo, planta y agua principalmente dependen de la composición, tamaño y concentración de los materiales. NPs de medida menor a 50 nm afectan negativamente la salud humana ya sea por inhalación, ingestión o exposición dérmica. En general, la NT ha incrementado el potencial de la producción agrícola, pero es muy limitado su conocimiento acerca de efectos adversos en suelo, planta y en humanos. Un inteligente uso de la NT podría lograr ayudar la seguridad alimentaria con la cualidad de un ambiente sostenible (Mailapall y Dubey, 2016).

Información acerca de la fitotoxicidad de las NPs a bajas concentraciones (ppb o bajas concentraciones en ppm) es escasa. Liu *et al.*, (2016) prepararon NPs de Cu, Zn, Mn y Fe en bajas concentraciones (<50 ppm), las cuales fueron aplicadas a plantas de lechuga dentro de un medio acuoso. Los resultados mostraron que las

NPs de CuO y ZnO fueron ligeramente más tóxicas que la aplicación de iones de Cu y Zn, y que las NPs de FeOx y MnOx no solo fueron menos tóxicas que su contraparte, sino que además demostraron un estímulo significativo en porte de plántulas (12-54% más de altura). En la Figura 1 y 2 se observan NPs Cu en tamaños de 40, 60 y 70 nm respectivamente, siendo la medida una de las características con mayor impacto de estos materiales.

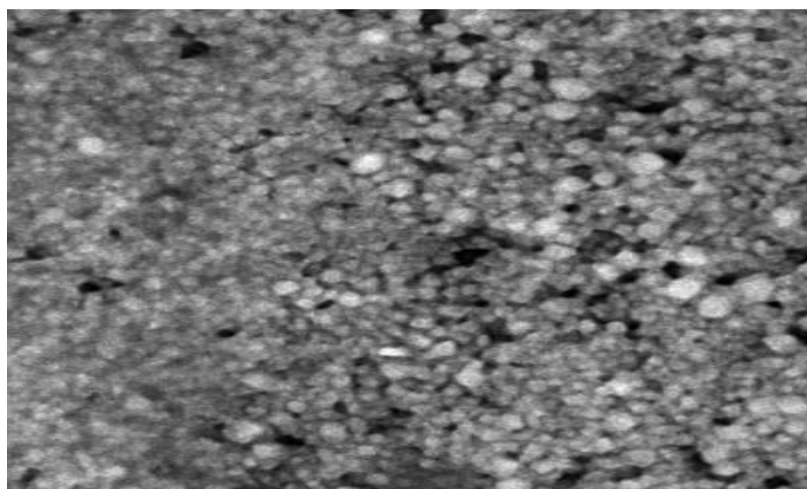


Figura 2. Microfotografía obtenida con un microscopio de escaneo de electrones (SEM). Las nanopartículas de cobre reportaron un tamaño entre 40 y 60 nanómetros (Ghorbani et al., 2015).

Las NPs de ZnO son consideradas contaminantes cuando están en altas concentraciones, y sus efectos en cultivos y en microorganismos del suelo causan preocupación y retos. A 400 mg kg^{-1} las NPs no presentaron efectos adversos significativos, pero inhibieron el crecimiento de maíz con 800 mg kg^{-1} (Wang et al., 2016). La biomasa de plántulas de pepino (*Cumumis sativus*) decreció significativamente en 75% y 35%, en comparación con el control al ser tratadas con 1000 mg L^{-1} de NPs de CuO y ZnO respectivamente. La biodisponibilidad y potencial de estrés oxidativo en las plantas expuestas a las partículas de óxido de metal fueron dependientes al tamaño, concentración y especie de NPs (Kim et al., 2012).

Los impactos ambientales de NPs a base de cobre son poco conocidos. En una investigación fueron aplicados algunos productos con base en cobre en plantas

de cilantro, entre ellos una nanopartícula de cobre y otra de óxido de cobre, demostrando que todos los tratamientos dañan la acumulación de nutrientes en brotes excepto Fe y Ni. Los resultados han mostrado que a pesar de bajas concentraciones (20 mg kg^{-1}) de las NPs con base en cobre afectan las cualidades nutricionales del cilantro, las cuales pueden tener un impacto en la salud humana (Zuverza-Mena *et al.*, 2015).

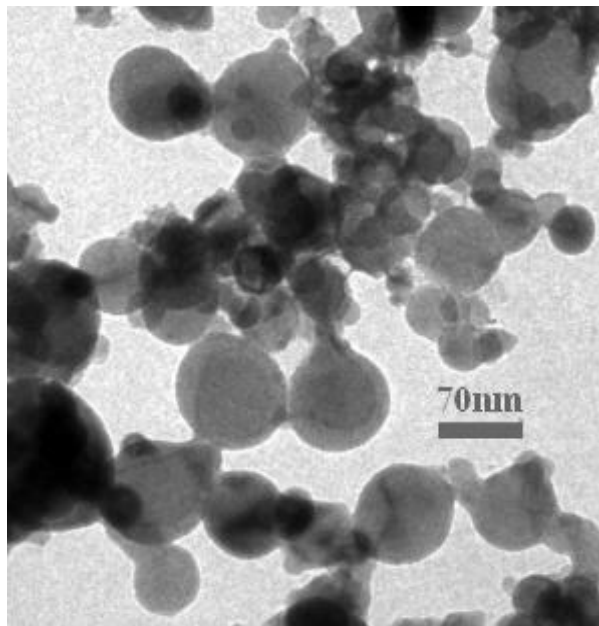


Figura 3. Nanopartículas de cobre con tamaño de 70 nm. (US Research Nanomaterials, Inc.)

Es posible que la NT cambie el uso de las sustancias químicas actuales por NPs, debido a que están diseñadas para tener un efecto exterminador más potente contra malezas y plagas. Sin embargo, los nanoplaguicidas pueden resultar más tóxicos que los agroquímicos convencionales para la flora y la fauna silvestre. La tendencia a la utilización de productos biocompatibles y biodegradables (nanocápsulas, sistemas micelares o dendrímeros) en base a biopolímeros, los cuales una vez que hayan liberado al plaguicida puedan biodegradarse, implicando eso un avance importante en la conservación del ambiente.

También es necesario un marco normativo que indique con qué tipo de materiales se están utilizando. Los nanoagroquímicos pueden disminuir considerablemente el uso de agroquímicos convencionales, al aprovechar su pequeño tamaño y mayor superficie de contacto, no obstante también podrían contaminar suelos y agua (Medina, *et al.*, 2010).

4.9 Nanotecnología en México

Se aprecia la manera en que la nanotecnología se inserta en el proceso de desarrollo capitalista de México y todo el mundo. En este contexto, encontramos que, ante la ausencia de una iniciativa nacional, la NT pareciera tener varias direcciones, en el caso de agronomía nanoplaguicidas, nanofertilizantes, nanoherbicidas y nanosensores. Pero a pesar de que no existe un orden claro, es evidente que la investigaciones y el desarrollo en México la están modelando las relaciones de competencia en el mercado.

La NT promete ser la próxima revolución industrial, de manera que aquellos países que no logren incorporarse podrían quedar fuera de la nueva redistribución industrial resultante de la competencia. Además, la economía mundial, basada cada vez más en el conocimiento y en la innovación tecnológica, coloca en desventaja a aquellos países que no invierten en educación y conocimiento. En este contexto la NT se presenta como una obligación, en lugar de una opción, y México considera que eso es adecuado para promover su desarrollo (Záyago-Lau y Foladori, 2010).

Brasil, México y Argentina son los países de América Latina donde el desarrollo de la NT está más avanzado. Aunque hay diferencias entre ellos, debidas principalmente a su distinta integración económica al mercado mundial y las políticas de cada país respecto al balance entre el mercado externo e interno, se pueden identificar algunas características comunes del desarrollo de la NT. Dos rasgos principales se han detectado, aunque con diferente nivel de presencia en cada país. El primer rasgo es la tendencia a la creación de centros de excelencia científica integrados a la industria, con el propósito de mejorar la competitividad internacional. Bajo un contexto de economías abiertas, la política de Ciencia y Tecnología priorizó

la ciencia aplicada, la evaluación de la actividad científica según estándares internacionales, y la incorporación de la investigación nacional a temas de vanguardia en la escena mundial. Esta estrategia requirió inversiones en infraestructura y equipamiento para crear centros de investigación competitivos con los de los países desarrollados (Foladori, *et al.*, 2012).

México tiene grupos muy importantes trabajando en la NT en sus principales universidades y centros de investigación. El trabajo realizado es de muy alta calidad y los resultados de estos estudios son publicados en las mejores revistas del mundo. Sin embargo, el presupuesto asignado a la investigación en nanociencia y nanotecnología es muy pequeño comparado no solamente con los países desarrollados, sino también con respecto a países de nuestra región, donde Brasil ya está tomando la delantera. No solo es necesario un mayor apoyo financiero del gobierno, sino también que entienda la importancia de la NT y lance una iniciativa nacional como ha ocurrido en muchos países.

Es fundamental que el financiamiento que se otorgue a los proyectos sea a largo plazo. También es importante construir un puente entre la academia y la industria para que la investigación científica se transforme en productos que la industria nacional pueda comercializar. Por último, es imprescindible que la población conozca la importancia y el potencial que este nuevo campo de la ciencia ofrece, que se enteren de que en el país existe un grupo de investigadores, el cual, aunque pequeño, está dando todo su esfuerzo para que la NT se desarrolle. Allí es primordial el aspecto de la difusión (Takeuchi y Mora Ramos, 2011).

La concentración de las actividades científicas en el campo de las nanociencias sugiere que el desarrollo de estas ciencias en México es el resultado de iniciativas institucionales. Por otra parte, el peso importante de las colaboraciones con países desarrollados y la baja asociación con países de la región latinoamericana nos llevan a pensar que existe una dependencia científica de grupos mexicanos de investigación con sus homólogos de los países desarrollados. Esto se refuerza si se tratan de colaboraciones donde los instrumentos científicos ocupan un lugar clave en la construcción de redes científicas (Robles *et al.*, 2008).

La NT presenta grandes oportunidades científicas, tecnológicas y económicas para cualquier país, y para que todo esto se aproveche se debe contar con apoyos para la investigación y desarrollo de esa disciplina, un aspecto que se requiere de la fuerte participación del gobierno mexicano. México cuenta con recursos humanos y la infraestructura necesaria para comenzar a hacer frente a esta nueva revolución tecnológica, pero, estrictamente, falta más apoyo por parte del gobierno y sus instituciones para que se alcance a plenitud la formación de más grupos interdisciplinarios y con interacción internacional, además de que se deben crear planes didácticos y posgrados que incentiven vocaciones universitarias en nanociencia, sobre todo experimentales, tanto en las instituciones de investigación como en las facultades de ciencias duras (física, biología, química, medicina, etc.), lo mismo que fomentar convenios entre instituciones educativas nacionales, del extranjero y con empresas privadas para el financiamiento de las investigaciones (Mendoza Uribe y Rodríguez-López, 2007).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del sitio

Este trabajo se realizó en el verano de 2016 en las instalaciones del CIQA (Centro de Investigación en Química Aplicada), dentro de un invernadero de tecnología media. El CIQA se localiza al noreste de la ciudad de Saltillo, Coah., México con las coordenadas geográficas 25°23´ Latitud Norte y 101°59´ Longitud Oeste con una altura de 1600 msnm.

5.2 Características climáticas del lugar

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

5.3 Preparación de soluciones de nanopartículas de cobre y sulfato de cobre

Las NPs de cobre utilizadas contenían un 99.8% de pureza con un tamaño de 25 nm adquiridas comercialmente en Houston, TX. Se prepararon soluciones madre de 100 ppm las cuales fueron disueltas en diferentes concentraciones para la obtención de las soluciones para cada tratamiento. Para el sulfato de cobre también se elaboraron soluciones madre para su posterior disolución en similares concentraciones a las de NPs de cobre. Antes de la aplicación se agitaron en tres tiempos de 15 minutos en un agitador Vortex para mantener una dispersión de las NP's.

5.4 Laboratorio

Para el experimento en laboratorio se utilizaron semillas de chile ancho variedad San Luis y tomate saladette. Se sometieron a imbibición en cajas Petri en cantidades de 25 semillas por caja con diferentes concentraciones de soluciones con NPs Cu o sulfato de cobre, Estas semillas después de haberse sometido a imbibición fueron colocadas en papel Anchor humedecido con agua destilada para su posterior germinación dentro de una cámara de germinación. Este proceso duró 14 días para la posterior toma de datos.

5.4.1 Imbibición de semillas

El tiempo de imbibición de semillas en NP's de cobre se determinó de acuerdo a las curvas de Imbibición de cada especie. Fueron preparadas semillas de tomate y chile ancho en cajas Petri, en cantidades de 25 semillas por caja con tres repeticiones por especie de semilla. Las semillas dentro de las cajas Petri fueron abastecidas con agua destilada. Cada hora las semillas fueron secadas y pesadas para obtener la masa de la semilla y así obtener la curva de imbibición.

5.4.2 Medición de variables

Las mediciones se hicieron al séptimo día y al finalizar en el día 14. En el séptimo día se tomó solo una variable la cual fue el total de semillas germinadas, mientras que en el día catorce se tomó el total de plántulas germinadas, plántulas anormales y semillas sin germinar. Para plántulas germinadas se tomaron las variables de longitud de radícula y longitud de plúmula. Se siguieron los reglamentos del ISTA (2004) para la evaluación de variables.

5.4.3 Análisis estadístico para semillas en laboratorio

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con 11 tratamientos y 4 repeticiones con 25 semillas por repetición, como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Especificaciones de los once tratamientos aplicados en semillas de tomate y chile ancho

| Tratamientos | |
|---------------------|-------------------------------|
| Control (T1) | |
| NPsCu (ppm) | CuSO₄ (ppm) |
| 0.5 (T2) | 0.5 (T7) |
| 1 (T3) | 1 (T8) |
| 5 (T4) | 5 (T9) |
| 10 (T5) | 10 (T10) |
| 50 (T6) | 50 (T11) |

5.5 Plantas en invernadero

Para el experimento en planta se obtuvieron plantas de pimiento Dicaprio de Enza Zaden y tomate saladette var. Zopilote de Aher ya germinadas y establecidas en charolas de 200 cavidades, con una altura promedio al momento de trasplante de 21.5 cm para pimiento y 19 cm para tomate respectivamente. El trasplante fue en macetas de 1 L, las cuales contenían sustrato compuesto de 70% peat moss y 30% de perlita, con base en volumen (v:v).

Para la fertilización se usó un sistema de fertirriego controlado por temporizador. Dicho sistema inyectaba una solución Steiner modificada a las condiciones del agua en el sitio con una conductividad eléctrica de 2.0 mmhos/cm y un pH de 6.0, la cual estuvo monitoreada constantemente para mantener los valores mencionados. Para la preparación de solución se excluyó el cobre ya que es el elemento en estudio. El experimento fue llevado a cabo en un invernadero de mediana tecnología el cual contaba con ventilación activa (pared húmeda y

ventiladores) el cual mantenía una temperatura promedio de 24°C dentro del invernadero.

5.5.1 Aplicación de cobre

Se hicieron dos aplicaciones de cobre (NPs Cu o sulfato de cobre dependiendo el tratamiento), una a la primera semana después de trasplante y otra a la tercera semana después de trasplante. Las aplicaciones fueron de manera foliar o directamente a la raíz con una pipeta. La primera aplicación fue de 1 mL y la segunda fue de 2 mL por planta.

5.5.2 Medición de variables

Se hicieron mediciones semanales de altura, número de hojas, índice de clorofila (Minolta SPAD 502), diámetro de tallo y número de flores y frutos en la tercera y cuarta semana. Las mediciones finales consistieron en la determinación de área foliar (LI-COR modelo LI-300, Lincoln, Nebraska, USA), longitud de raíz y pesos frescos de hojas y tallos, tales muestras se secaron para obtener el peso seco de raíz, hojas y tallo. A la tercera semana se utilizó el aparato IRGA (sistema de intercambio de gases), con el cual se midieron diferentes variables como transpiración, fotosíntesis y conductancia estomática, estas variables se presentan solo como observaciones extras a los resultados obtenidos ya que se tuvo un día en el cual hubo nublados parciales y lluvias cortas, además de vientos a medio día lo cual nos imposibilita poder discutir algo concreto con los datos obtenidos debido a las condiciones.

5.5.3 Análisis estadístico para plantas en invernadero

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con 7 tratamientos y 12 repeticiones por especie de planta como se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 2: Características de los tratamientos aplicados a plantas cultivadas en invernadero (tomate y pimiento).

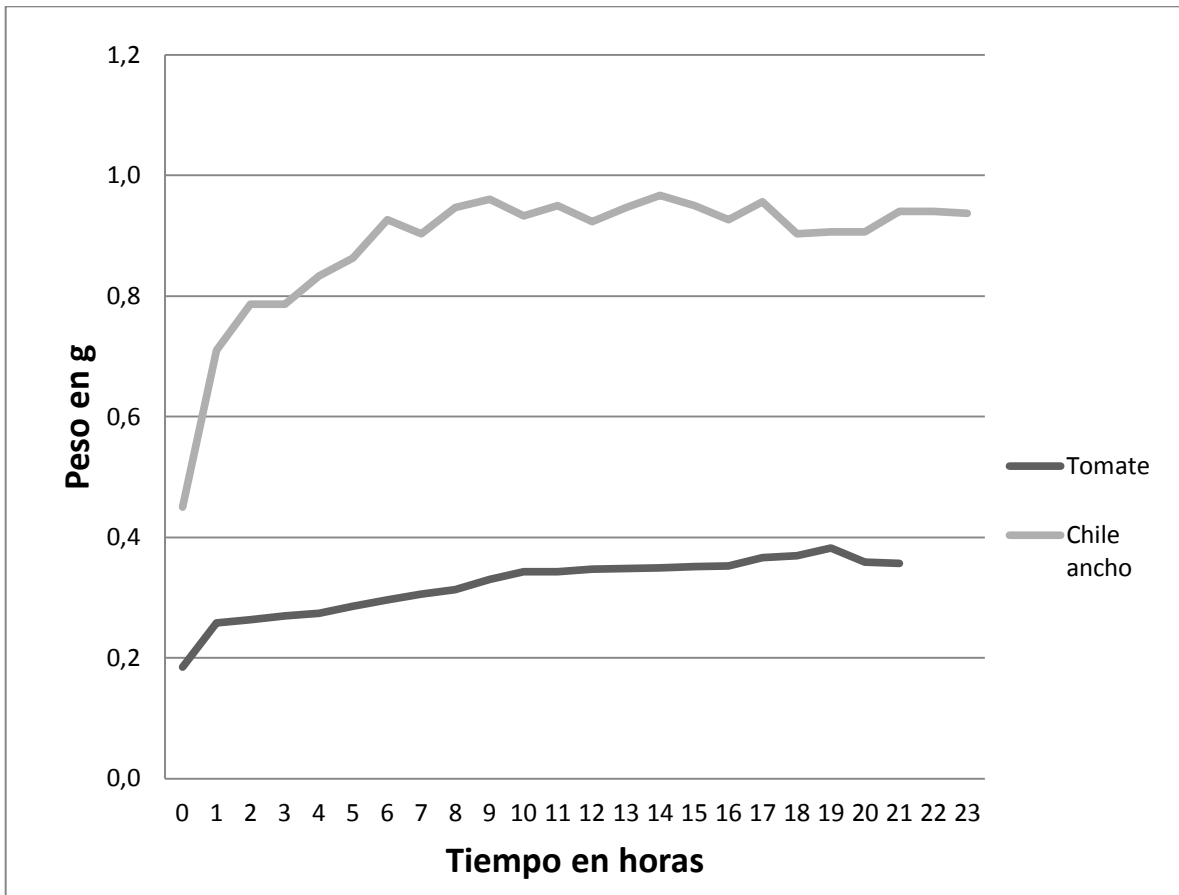
Cuadro 2. Características de los tratamientos aplicados a plantas cultivadas en invernadero (tomate y pimiento)

| Tratamiento | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 |
|---------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Especificación | Control | CuSO ₄ | CuSO ₄ | NPsCu | NPsCu | NPsCu | NPsCu |
| Concentración (ppm) | 0 | 25 | 50 | 25 | 50 | 25 | 50 |
| Forma de aplicación | 0 | A raíz | A raíz | Foliar | Foliar | A raíz | A raíz |

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Curvas de imbibición

Figura 4. Curvas de imbibición promedio de semillas de tomate y chile ancho.



Es importante conocer las curvas de imbibición ya que nos establecen un tiempo óptimo de imbibición, se puede ver en la Figura 4 el diferente comportamiento que tienen las semillas de tomate y las de chile ancho en una imbibición con agua destilada.

6.2 Resultados en variables fisiológicas de semillas de tomate por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de nanopartículas de cobre y micropartículas de sulfato de cobre.

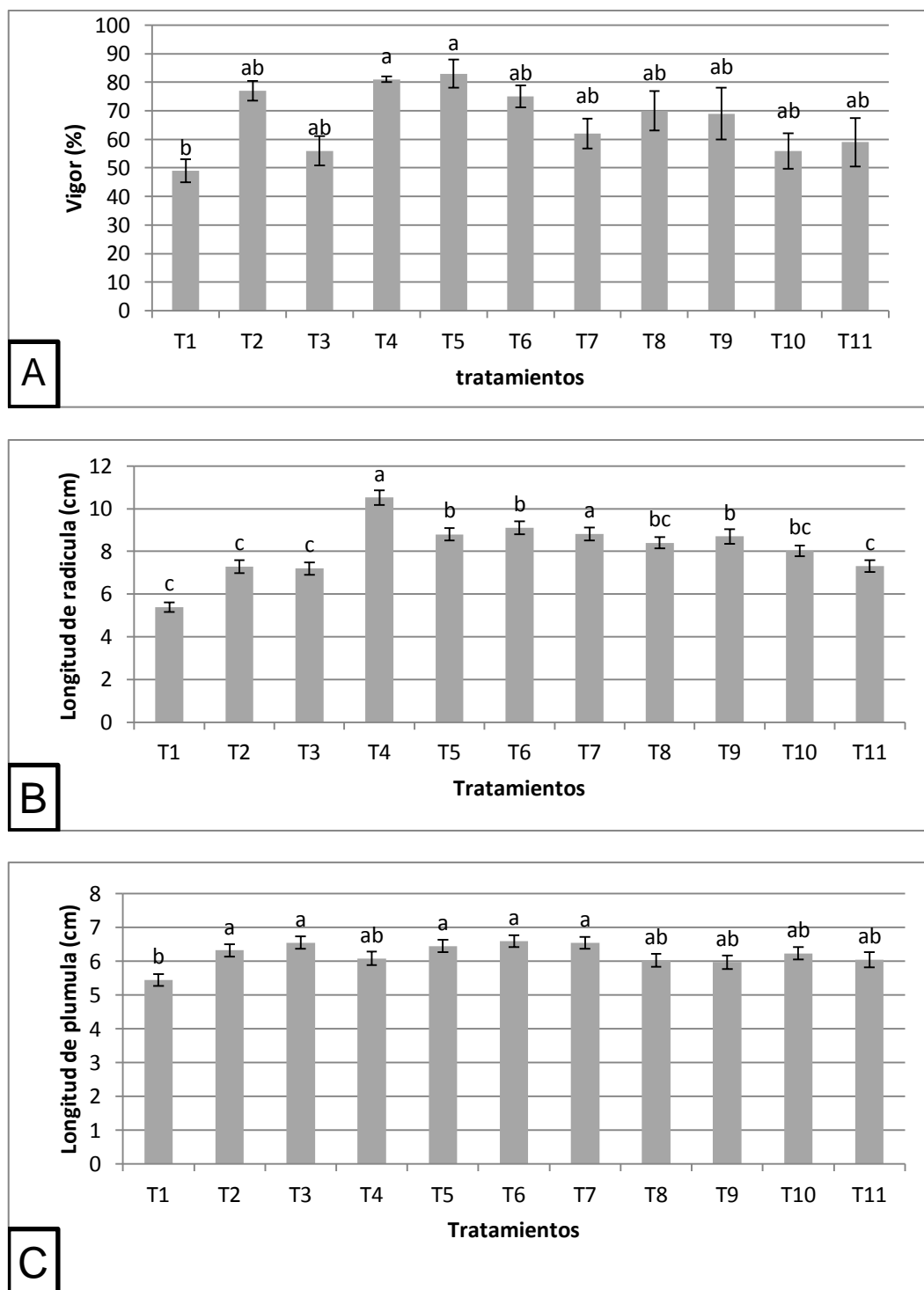
Cuadro 3. Resultados estadísticos para semillas y plántulas de tomate. A: vigor (%), germinación (%), plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%). B: longitud de raíz y plúmula de plántulas obtenidas

| A. Semillas y Plántulas de tomate | | | | |
|------------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Variables y tratamientos | Vigor (%) | Germinación (%) | Plántulas anormales (%) | Semillas sin germinar (%) |
| Control T1 | 49±4.12b | 84±8.64a | 12±5.16a | 4±4.00a |
| Nanopartículas de cobre | | | | |
| T2 | 77±3.42ab | 92.0±2.31a | 3±1.91a | 5±2.52a |
| T3 | 56±5.16ab | 85.0±2.52a | 10±2.58a | 5±3.00a |
| T4 | 81±1.00a | 93±3.42a | 1±1.00a | 6±3.41a |
| T5 | 83±5.00a | 96±1.63a | 3±1.91a | 1±1.00a |
| T6 | 75±3.79ab | 95±1.92a | 3±1.91a | 2±2.00a |
| Micropartículas de sulfato de cobre | | | | |
| T7 | 62±5.29ab | 90±2.58a | 4±1.63a | 6±1.15a |
| T8 | 70±6.83ab | 94±1.15a | 5±1.00a | 1±1.00a |
| T9 | 69±9.00ab | 92±1.63a | 5±1.91a | 3±1.00a |
| T10 | 58±6.22ab | 95±1.00a | 3±1.91a | 2±1.15a |
| T11 | 59±8.54ab | 90±5.03a | 4±2.31a | 6±3.83a |
| P>F | 0.0019* | 0.3148 | 0.0778 | 0.7579 |

| B. Plántulas de tomate | | |
|-------------------------------------|----------------|----------------|
| Variables | LR (cm) | LP (cm) |
| T1 | 5.38±0.23c | 5.44±0.17b |
| Nanopartículas de cobre | | |
| T2 | 7.29±0.31c | 6.32±0.18a |
| T3 | 7.20±0.29c | 6.55±0.18a |
| T4 | 10.52±0.34a | 6.08±0.20ab |
| T5 | 8.80±0.29b | 6.45±0.19a |
| T6 | 9.10±0.31b | 6.59±0.18a |
| Micropartículas de sulfato de cobre | | |
| T7 | 8.81±0.31a | 6.54±0.22a |
| T8 | 8.40±0.28bc | 6.02±0.19ab |
| T9 | 8.70±0.34b | 5.97±0.20ab |
| T10 | 8.02±0.26bc | 6.23±0.18ab |
| T11 | 7.30±0.27c | 6.04±0.17ab |
| P>F | <0.0001* | 0.0004* |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

Figura 5. Resultados que muestran diferencias estadísticas para semillas y plántulas de tomate. A: vigor (%), B: longitud de radícula (cm), C: longitud de plúmula (cm)



Letras diferentes representan diferencias estadísticas. Pruebas Tukey ($P < 0.05$).

6.3 Resultados en variables fisiológicas de semillas de chile ancho por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de nanopartículas de cobre y micropartículas de sulfato de cobre

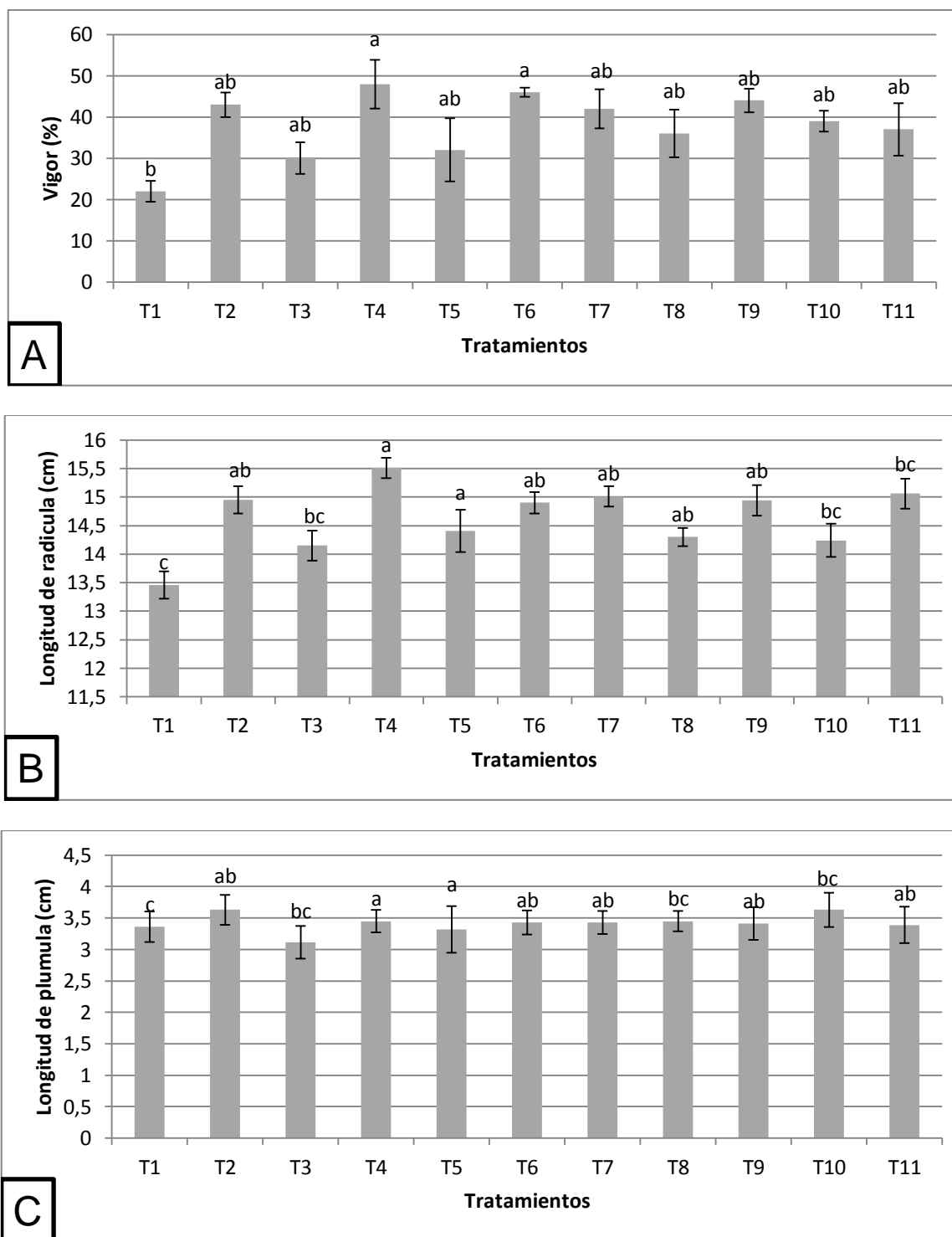
Cuadro 4. Resultados estadísticos para semillas y plántulas de chile ancho. A: vigor (%), germinación (%), plántulas anormales (%), semillas sin germinar (%). B: longitud de raíz y plúmula de plántulas obtenidas

| A. Semilla y plántulas de chile ancho | | | | |
|----------------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| VARIABLES | Vigor (%) | Germinación (%) | Plántulas anormales (%) | Semillas sin germinar (%) |
| Control (T1) | 22.0±2.58b | 88.0±1.63a | 10.0±1.15a | 2.0±1.15a |
| Nanopartículas de cobre | | | | |
| T2 | 43.0±3.00ab | 72.0±7.83a | 25.0±7.19a | 3.0±1.00a |
| T3 | 30.0±3.83ab | 97.0±1.92a | 3.0±1.91a | 0.0±0.00a |
| T4 | 48.0±5.89a | 93.0±4.44a | 6.0±4.76a | 2.0±1.15a |
| T5 | 32.0±7.66ab | 76.0±10.95a | 21.0±9.00a | 3.0±3.00a |
| T6 | 46.0±1.15a | 94.0±2.00a | 2.0±1.15a | 4.0±1.63a |
| Micropartículas de sulfato de cobre | | | | |
| T7 | 42.0±4.76ab | 86.0±7.57a | 12.0±7.12a | 2.0±1.15a |
| T8 | 36.0±6.32ab | 94.0±4.76a | 5.0±3.79a | 1.0±1.00a |
| T9 | 44.0±2.83ab | 89.0±1.00a | 9.0±1.00a | 2.0±1.15a |
| T10 | 39.0±2.52ab | 78.0±6.83a | 21.0±6.81a | 1.00±1.00a |
| T11 | 37.0±5.74ab | 90.0±7.39a | 9.0±1.00a | 1.0±1.00a |
| P>F | 0.0120* | 0.0830 | 0.0497 | 0.7381 |

| B. Plántulas de chile ancho | | |
|-------------------------------------|----------------|----------------|
| Variables | LR (cm) | LP (cm) |
| Control T1 | 13.46±0.24c | 3.36±0.14ab |
| Nanopartículas de cobre | | |
| T2 | 14.95±0.24ab | 3.63±0.06a |
| T3 | 14.15±0.26bc | 3.11±0.06b |
| T4 | 15.51±0.18a | 3.45±0.05ab |
| T5 | 14.41±0.37a | 3.32±0.07ab |
| T6 | 14.90±0.19ab | 3.43±0.06ab |
| Micropartículas de sulfato de cobre | | |
| T7 | 15.01±0.18ab | 3.43±0.06ab |
| T8 | 14.30±0.16bc | 3.45±0.12ab |
| T9 | 14.94±0.26ab | 3.41±0.06ab |
| T10 | 14.24±0.29bc | 3.63±0.07a |
| T11 | 15.06±0.27ab | 3.39±0.06ab |
| P>F | <0.0001* | 0.047* |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

Figura 6. Resultados que muestran diferencias estadísticas para semillas y plántulas de chile.



Letras diferentes representan diferencias estadísticas. Pruebas Tukey ($P < 0.05$).

6.4 Resultados en variables fisiológicas en plantas de tomate por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de NPs de cobre y micropartículas de sulfato de cobre.

Cuadro 5. Resultados estadísticos para plantas de tomate en invernadero. A: muestreo 1 (primera semana), B: muestreo 2 (segunda semana), C: muestreo 3 (tercera semana), D: muestreo 4 (cuarta semana)

| A. Muestreo 1 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 18.81 ±0.33a | 18.92 ±0.36a | 18.92 ±0.33a | 18.88 ±0.43a | 19.10 ±0.32a | 19.33 ±0.29a | 18.71 ±0.41a | 0.9293 |
| IR Clorofila (SPAD) | 39.43 ±1.22a | 37.98 ±3.90a | 40.35 ±1.02a | 39.27 ±0.78a | 37.88 ±1.21a | 39.79 ±1.44a | 40.84 ±1.05a | 0.4644 |
| Diámetro de tallo (mm) | 3.08 ±0.13a | 2.96 ±0.09a | 3.00 ±0.08a | 3.00 ±0.10a | 2.98 ±0.09a | 3.11 ±0.12a | 2.91 ±0.05a | 0.8485 |

| B. Muestreo 2 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 23.77 ±0.39a | 23.58 ±0.59a | 23.60 ±0.47a | 23.41 ±0.43a | 23.72 ±0.45a | 23.90 ±0.52a | 23.48 ±0.51a | 0.9958 |
| IR Clorofila (SPAD) | 46.98 ±0.86a | 47.02 ±0.86a | 48.02 ±0.73a | 46.99 ±1.01a | 45.94 ±0.60a | 46.72 ±0.62a | 46.96 ±0.97a | 0.7687 |
| Diámetro de tallo (mm) | 3.68 ±0.15a | 3.24 ±0.10a | 3.66 ±0.11a | 3.65 ±0.12a | 3.53 ±0.08a | 3.47 ±0.13a | 3.45 ±0.10a | 0.0916 |
| Número de hojas | 6.00 ±0.21a | 6.17 ±0.21a | 6.17 ±0.17a | 6.08 ±0.15a | 6.25 ±0.13a | 5.92 ±0.23a | 5.83 ±0.17a | 0.6753 |

| C. Muestreo 3 | | | | | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 49.17 ±0.92a | 51.46 ±1.01a | 50.00 ±1.12a | 49.58 ±1.19a | 51.71 ±1.02a | 50.33 ±1.83a | 49.77 ±0.97a | 0.6803 |
| IR Clorofila (SPAD) | 47.82 ±1.01 a | 45.59 ±0.86a | 47.90 ±1.04a | 45.64 ±1.14a | 46.81 ±0.97a | 47.43 ±0.91a | 47.45 ±1.05a | 0.4630 |
| Diámetro de tallo (mm) | 5.54 ±0.16 a | 4.61 ±0.15a | 4.54 ±0.13a | 4.55 ±0.09a | 4.40 ±0.16a | 4.66 ±0.12a | 4.44 ±0.14a | 0.8647 |
| Número de hojas | 10.58 ±1.31 a | 9.92 ±0.23a | 11.17 ±0.59a | 11.08 ±0.67a | 11.50 ±0.44a | 10.75 ±0.51a | 10.42 ±0.43a | 0.3138 |
| Número de flores | 3.33 ±1.78a | 2.83 ±0.66a | 3.50 ±0.45a | 2.92 ±0.51a | 2.58 ±0.58a | 3.00 ±0.55a | 2.83 ±0.49a | 0.9138 |

| D. Muestreo 4 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 63.25 ±1.39a | 67.29 ±1.71a | 63.96 ±3.99a | 65.12 ±1.66a | 65.71 ±1.25a | 67.00 ±2.08a | 63.25 ±1.80a | 0.4311 |
| IR Clorofila (SPAD) | 44.08 ±0.97a | 45.23 ±0.77a | 44.36 ±1.39a | 43.95 ±0.74a | 43.32 ±0.52a | 43.74 ±0.73a | 45.32 ±0.59a | 0.5989 |
| Diámetro de tallo (mm) | 4.91 ±0.10a | 4.74 ±0.12a | 4.92 ±0.10a | 5.00 ±0.09a | 4.84 ±0.13a | 4.81 ±0.10a | 4.91 ±0.12a | 0.8703 |
| Número de hojas | 13.13 ±0.36a | 12.67 ±0.33a | 13.08 ±0.77a | 12.73 ±0.54a | 14.58 ±0.54a | 12.75 ±0.49a | 12.75 ±0.49a | 0.1241 |
| Número de flores | 6.17 ±0.42a | 5.58 ±0.69a | 5.46 ±0.51a | 5.36 ±0.43a | 5.25 ±0.60a | 4.92 ±0.77a | 5.08 ±0.57a | 0.8203 |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

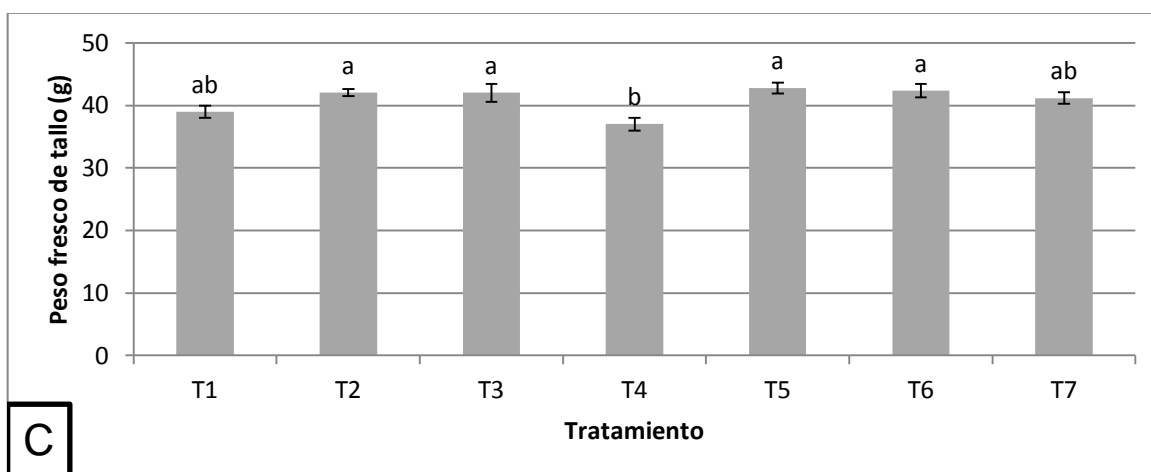
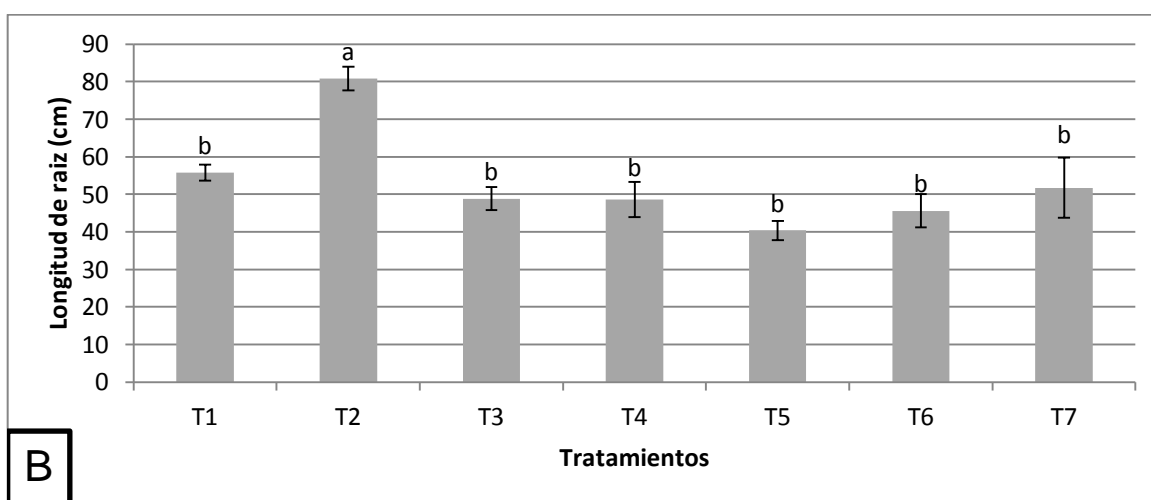
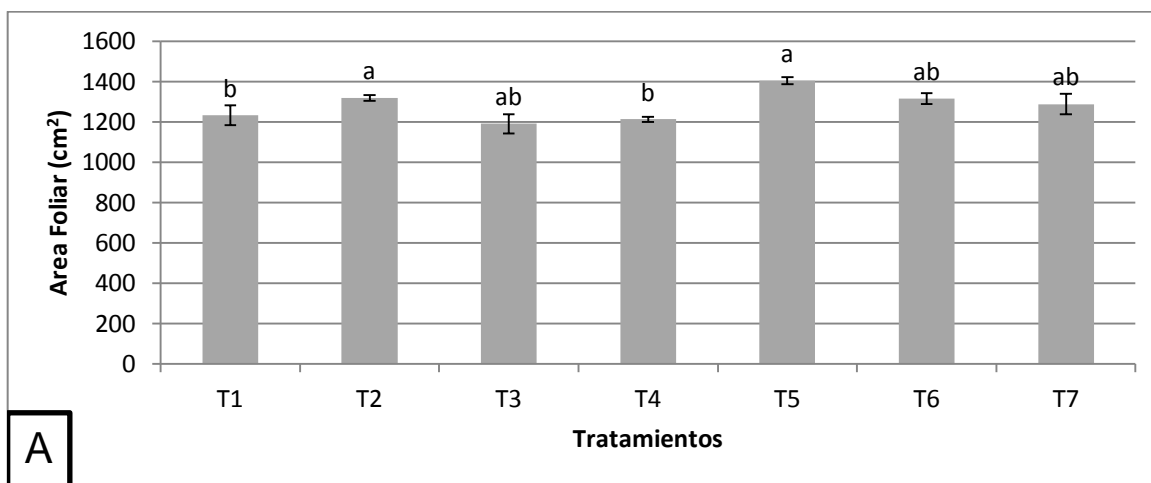
Cuadro 6. Muestreo final en plantas de tomate. A: muestreo final en plantas frescas, B: muestreo final de pesos secos

| A. Muestreo final en plantas frescas | | | | | | | | |
|---------------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| Variabes | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Área foliar (cm) | 1232.2 ±49.75b | 1318.9± 14.53ab | 1191.8 ±47.09ab | 1213.0 ±13.14b | 1403.7 ±18.50a | 1315.7 ±25.82ab | 1288.1 ±50.76ab | 0.0030* |
| Longitud de raíz (cm) | 55.70 ±2.14b | 80.80 ±3.16a | 48.80 ±3.06b | 48.60 ±4.75b | 40.36 ±2.53b | 45.58 ±4.46b | 51.72 ±8.04b | <.0001* |
| Peso fresco de hojas (gr) | 29.03 ±0.80a | 28.56 ±0.82a | 30.84 ±0.52a | 29.03 ±1.05a | 31.15 ±0.29a | 31.41 ±0.40a | 30.16 ±0.61a | 0.0579 |
| Peso fresco de tallo (gr) | 38.96 ±0.96ab | 42.06 ±0.55a | 42.02 ±1.45a | 37.03 ±1.02b | 42.80 ±0.87a | 42.36 ±1.08a | 41.16 ±0.89ab | 0.0027* |

| B. Muestreo final de pesos secos | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| Variabes | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Peso seco de raíz (g) | 1.73 ±0.14 a | 1.41 ±0.08a | 2.21 ±0.60a | 1.51 ±0.11a | 1.47 ±0.08a | 1.63 ±0.01a | 1.63 ±0.14a | 0.3402 |
| Peso seco de tallo (g) | 6.59 ±0.70a | 6.80 ±0.17a | 6.76 ±0.58a | 4.99 ±0.50a | 5.54 ±0.24 a | 6.80 ±0.66a | 6.26 ±0.28a | 0.0883 |
| Peso seco de hoja (g) | 4.18 ±0.20a | 4.07 ±0.18a | 4.60 ±0.09a | 4.22 ±0.29a | 4.45 ±0.05a | 4.59 ±0.14a | 4.65 ±0.04a | 0.1048 |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

Figura 7. Resultados que muestran diferencias estadísticas en plantas de tomate. A: área foliar (cm²), B: longitud de raíz (cm), C: peso fresco de tallo (g).



Letras diferentes representan diferencias estadísticas. Pruebas Tukey ($P < 0.05$).

6.5 Resultados en variables fisiológicas en plantas de pimiento por efecto de la aplicación de dosis (ppm) de NPs de cobre y micropartículas de sulfato de cobre

Cuadro 7. Resultados estadísticos para plantas de pimiento en invernadero. A: muestreo 1 (primera semana), B: muestreo 2 (segunda semana), C: muestreo 3 (tercera semana), D: muestreo 4 (cuarta semana)

| A. Muestreo 1 | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 21.75 ±0.56a | 21.17 ±0.59a | 21.58 ±0.53a | 21.00 ±0.61a | 21.88 ±0.53a | 21.96 ±0.39a | 22.29 ±0.42a | 0.6121 |
| IR Clorofila (SPAD) | 47.40 ±0.67a | 45.85 ±1.26a | 45.86 ±0.78a | 46.08 ±1.38a | 45.17 ±1.29a | 47.00 ±0.98a | 44.91 ±0.01a | 0.6518 |
| Diámetro de tallo | 3.87 ±0.06a | 4.29 ±0.16a | 3.84 ±0.15a | 4.31 ±0.17a | 4.12 ±0.20a | 4.04 ±0.11a | 3.99 ±0.13a | 0.1651 |

| B. Muestreo 2 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 21.88 ±0.55a | 21.51 ±0.49a | 21.57 ±0.53a | 21.58 ±0.54a | 21.93 ±0.42a | 22.28 ±0.43a | 22.33 ±0.52a | 0.8761 |
| IR Clorofila (SPAD) | 50.01 ±1.68a | 52.56 ±0.94a | 51.95 ±1.58a | 52.09 ±0.51a | 51.95 ±1.53a | 51.62 ±0.56a | 52.84 ±0.54a | 0.5777 |
| Diámetro de tallo (mm) | 3.94 ±0.07a | 4.28 ±0.13a | 3.90 ±0.12a | 3.98 ±0.10a | 3.93 ±0.12a | 4.10 ±0.13a | 4.01 ±0.12a | 0.2247 |
| Número de hojas | 12.08 ±0.43a | 11.92 ±0.43a | 10.67 ±0.36a | 10.83 ±0.41a | 11.00 ±0.41a | 11.75 ±0.54a | 11.42 ±0.47a | 0.1512 |
| Número de flores | 2.25 ±0.28a | 2.33 ±0.26a | 2.17 ±0.28a | 2.50 ±0.28a | 2.42 ±0.34a | 2.33 ±0.31a | 2.08 ±0.31a | 0.9632 |

| C. Muestreo 3 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 28.79 ±0.63a | 28.53 ±0.59a | 27.67 ±0.71a | 27.48 ±0.61a | 28.03 ±0.39a | 28,90 ±0.59a | 28.69 ±0.59a | 0.4847 |
| IR Clorofila (SPAD) | 54.32 ±0.99a | 51.52 ±1.04a | 54.02 ±1.10a | 53.17 ±1.02a | 55.08 ±1.12a | 53.17 ±1.46a | 57.97 ±0.86a | 0.2579 |
| Diámetro de tallo (mm) | 4.85 ±0.15 a | 5.18 ±0.17a | 4.68 ±0.10a | 4.99 ±0.14a | 5.17 ±0.26a | 4.98 ±0.10a | 4.93 ±0.12a | 0.3139 |
| Número de hojas | 30.83 ±1.81a | 31.42 ±1.77a | 27.75 ±1.67a | 29.50 ±1.65a | 29.42 ±1.65a | 33.58 ±1.61a | 33.58 ±1.76a | 0.1493 |
| Número de flores | 7.92 ±0.51 a | 8.83 ±0.42a | 8.00 ±0.68a | 8.50 ±0.53a | 8.00 ±0.67a | 8.75 ±0.88a | 8.08 ±0.50a | 0.9072 |

| D. Muestreo 4 | | | | | | | | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Variables | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Altura (cm) | 32.58 ±0.80ab | 32.88 ±0.81ab | 32.88 ±0.60ab | 30.04 ±0.77b | 31.25 ±0.46 ab | 32.12 ±0.89ab | 33.13 ±0.56a | 0.0330 * |
| IR Clorofila (SPAD) | 57.24 ±0.91a | 56.16 ±0.56a | 55.92 ±1.09a | 54.39 ±1.17a | 57.04 ±0.55 a | 56.54 ±0.67a | 57.08 ±0.71a | 0.2265 |
| Diámetro de tallo | 5.43 ±0.10a | 5.45 ±0.08a | 5.23 ±0.10a | 5.18 ±0.09a | 5.39 ±0.09a | 5.32 ±0.06a | 5.42 ±0.09a | 0.2158 |
| Número de hojas | 44.17 ±2.67a | 42.51 ±1.21a | 38.42 ±2.03a | 38.92 ±2.17a | 38.75 ±2.07a | 42.75 ±1.75a | 43.75 ±1.86a | 0.1654 |
| Número de flores | 21.83 ±1.21a | 21.58 ±1.22a | 19.83 ±1.09a | 18.75 ±1.04a | 19.58 ±1.19a | 22.33 ±0.90a | 20.08 ±2.05a | 0.3825 |
| Número de frutos | 1.17 ±0.29a | 1.08 ±0.19a | 1.00 ±0.28a | 1.17 ±0.24a | 0.83 ±0.32a | 1.50 ±0.40a | 1.17 ±0.34a | 0.8418 |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

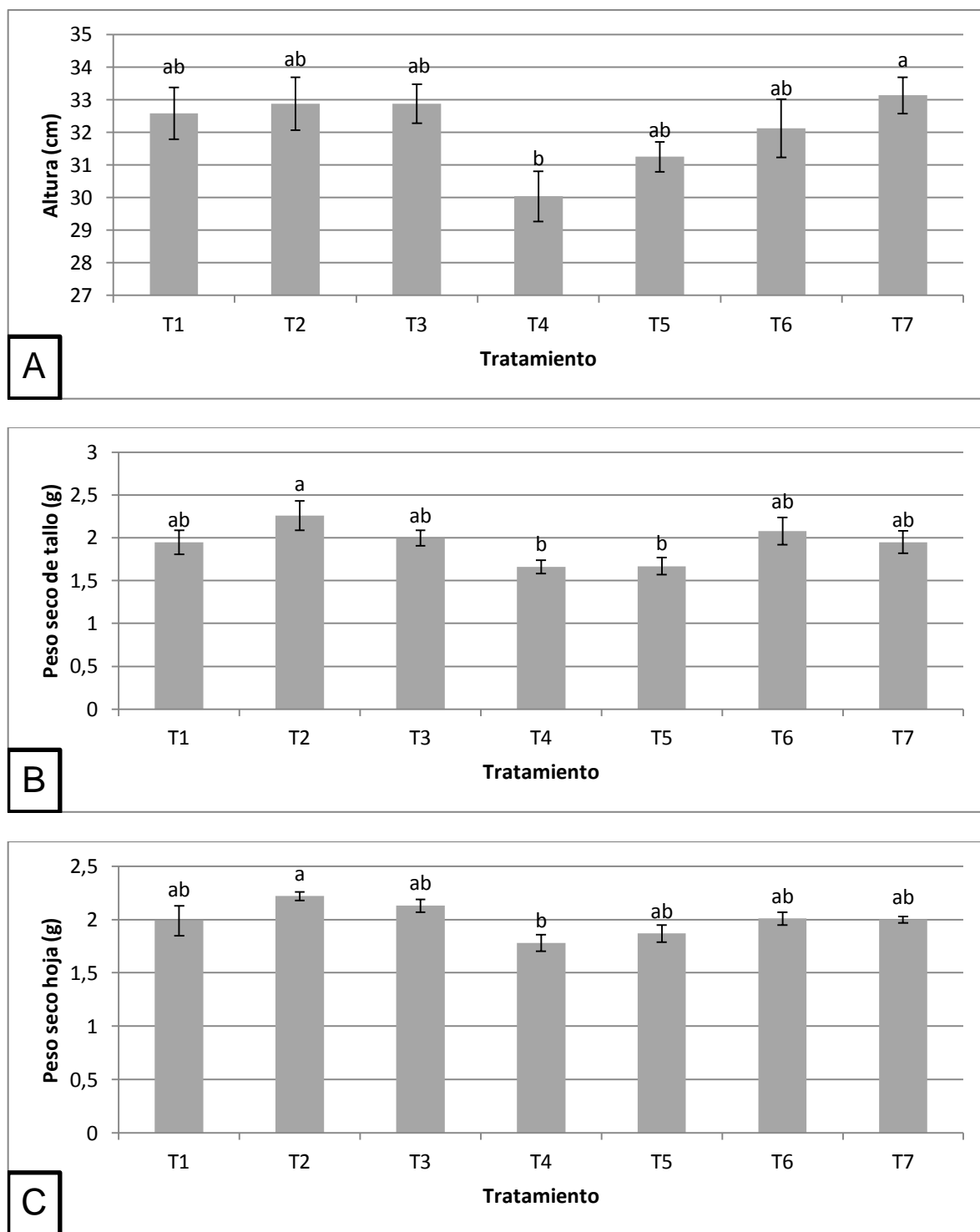
Cuadro 8. Muestreo final en plantas de pimiento. A: muestreo final en plantas frescas, B: muestreo final de pesos secos

| A. Muestreo final en plantas frescas | | | | | | | | |
|---------------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Variable | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Área foliar (cm) | 524.0 ±76.36a | 629.57 ±17.74a | 595.41 ±26.73a | 561.16 ±13.76a | 551.41 ±20.81a | 580.37 ±29.38a | 616.75 ±14.20a | 0.3655 |
| Longitud raíz (cm) | 25.34 ±1.34a | 28.64 ±0.89a | 26.46 ±1.02a | 27.92 ±1.68a | 27.40 ±1.22a | 27.92 ±1.46a | 28.02 ±0.83a | 0.5566 |
| Peso fresco de hojas (g) | 14.40 ±1.14a | 17.17 ±0.74a | 15.92 ±0.62a | 14.55 ±0.33a | 14.60 ±0.43a | 15.12 ±0.58a | 15.85 ±0.41a | 0.0612 |
| Peso fresco de tallo (g) | 16.70 ±1.36a | 17.49 ±2.16a | 18.12 ±0.92a | 14.30 ±0.76a | 14.63 ±0.85a | 19.51 ±1.80a | 17.95 ±0.95a | 0.0443 |

| B. Muestreo final de pesos secos | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Variabes | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | P>F |
| Peso seco de raíz (g) | 1.12 ±0.09a | 1.35 ±0.08a | 1.28 ±0.15a | 1.18 ±0.04a | 1.10 ±0.05a | 1.21 ±0.05a | 1.27 ±0.08a | 0.3630 |
| Peso seco de tallo (g) | 1.95 ±0.14ab | 2.26 ±0.17a | 2.00 ±0.09ab | 1.66 ±0.08b | 1.67 ±0.10b | 2.08 ±0.16ab | 1.95 ±0.13ab | 0.0307 * |
| Peso seco de hoja (g) | 1.99 ±0.14ab | 2.22 ±0.04a | 2.13 ±0.06ab | 1.78 ±0.08 b | 1.87 ±0.08ab | 2.01 ±0.06ab | 2.00 ±0.03ab | 0.0107 * |

Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas. *diferencia significativa, pruebas Tukey (P<0.05).

Figura 8. Resultados que muestran diferencias estadísticas en plantas de tomate. A: altura (cm), B: peso seco de tallo (g), C: peso seco de hojas (g).



Letras diferentes representan diferencias estadísticas. Pruebas Tukey ($P < 0.05$).

6.6 Discusiones

El tiempo de imbibición en semillas se estableció de acuerdo al máximo peso alcanzado en el transcurso del tiempo. Después de la imbibición fueron establecidas en el papel Anchor. Los metales pueden conducir al incremento de los niveles de especies reactivas del oxígeno a través de diferentes mecanismos. Los metales capaces de modificar sus estado de oxidación como el hierro y el cobre ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ o $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$) pueden participar en las reacciones de Haber Weiss y Fenton que resultan en la formación del radical hidroxilo (Azpilicueta *et al.*, 2010).

En el caso de semilla de tomate podemos encontrar un máximo de peso a la hora 20 después de comenzar la imbibición, mientras que para chile ancho encontramos el máximo peso a la hora 14. Los resultados estadísticos nos muestran diferentes tendencias en cuanto a la aplicación de cobre, ya sea como nanopartícula o como sulfato de cobre. En cuanto a semillas de tomate se encuentra diferencia significativa en variables de vigor de germinación al séptimo día, longitud de radícula y longitud de plúmula. En relación a porcentaje de vigor las más altas medias las obtenemos con la aplicación de NPsCu a 5 y 10 mg L^{-1} , mientras que la longitud de radícula también incrementa a 5 mg L^{-1} de NPs y 0.5 mg L^{-1} de sulfato de cobre, no coincidiendo con Stampoulis *et al.*, (2009) el cual menciona una toxicidad en germinación de semilla y una disminución de la longitud de radícula emergente hasta en un 77% con la aplicación de NPs de Cu en comparación con el control. En relación con la longitud de plúmula se obtienen las máximas longitudes a 50 y 1 mg L^{-1} de NPs de Cu. El control obtiene los valores más bajos en las variables de vigor, germinación, longitud de radícula y longitud de plúmula; obteniéndose también el mayor porcentaje de plántulas anormales.

Las semillas de chile ancho también se vieron afectadas por la aplicación de cobre, siendo las NPs de Cu las que obtienen el mayor porcentaje de vigor a los 7 días en concentraciones de 5 y 50 mg L^{-1} . El mejor porcentaje de germinación lo encontramos a concentraciones de 1 mg L^{-1} de NPs, aunque no hay diferencias significativas en los tratamientos. El número de plántulas anormales fue aumentado con la aplicación de NPs a 0.5 mg L^{-1} . La longitud de radícula fue aumentada con la

aplicación de 5 y 10 mg L⁻¹ de NPS de Cu, mientras que la longitud de plúmula alcanzo las longitudes más altas con la aplicación de 0.5 de NPs y con 10 mg L⁻¹ de sulfato de cobre; el control muestra los valores más bajos para vigor al séptimo día y longitud de plúmula, además de también estar en los más bajos valores para porcentaje de germinación y longitud de radícula. De acuerdo a Liu *et al.*, (2016), la aplicación de NPs de Cu resultan ligeramente toxica en semillas de lechuga, lo cual es contrario a lo obtenido para semillas de tomate y chile ancho.

De acuerdo con Shi *et al.*, (2014), quienes experimentaron con una planta tolerante a Cu *Elsholtzia splendens* muestran que hay mayor acumulación de Cu en células de la raíz y hojas con la aplicación de NPs de CuO en comparación con las plantas expuestas a partículas de mayor tamaño de Cu y CuO. En plantas de pimiento en invernadero, las variables que obtienen diferencia significativa entre tratamientos son: la altura final, obteniéndose la media mayor con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de NPs de Cu en forma directa a la raíz, mientras que la aplicación foliar de 25 mg L⁻¹ de NPs de Cu fue la que obtuvo la menor altura; en cuanto al peso seco de tallo y peso seco de hoja, se obtuvieron en ambas variables los mayores pesos con la aplicación de sulfato de cobre y los menores pesos con la aplicación foliar de 25 mg L⁻¹ de NPs de Cu también en ambos casos. En relación a las otras variables restantes no se encuentran diferencias significativas antes y después de la aplicación de Cu ya sea como sulfato o como NPs; en cuanto a las tendencias podemos encontrar que las aplicaciones foliares son las que muestran los valores más bajos en la mayoría de las variables.

Para plantas de tomate en invernadero, las variables muestran significancia en: área foliar en cm², en donde el mayor valor se obtiene con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de NPs de manera foliar; longitud de raíz en cm obteniéndose el valor máximo en el tratamiento con 25 mg L⁻¹ de sulfato de cobre y notándose una reducción en longitud con la aplicación de NPs en comparación con el control, otro experimento que evidencia la disminución en la elongación de raíz por la aplicación de NPs de CuO es el de Peng *et al.*, (2015), en el cual se menciona una fitotoxicidad generada por la producción de especies reactivas de oxígeno, las cuales causan la

peroxidación de lípidos, disfunción mitocondrial y la programación de la muerte celular. En cuanto a peso fresco de hojas y peso fresco de tallo los más altos valores los encontramos con la aplicación de 50 mg L⁻¹ de NPs de Cu de manera foliar y 25 mg L⁻¹ de las NPs aplicadas de manera directa a la raíz comportándose similarmente en ambos casos.

Las tendencias de los resultados en relación con las aplicaciones, aunque no se muestran diferencias estadísticas, muestran que las variables en la mayoría de los casos son menores para aplicaciones foliares de NPs incluso en algunos casos los valores son más bajos en relación al control. De acuerdo con Juárez-Maldonado *et al.*, (2016), las plantas de tomate se ven modificadas por la aplicación de NPs de Cu, encontrando aumentos en la producción de catalasa y licopeno en fruto.

VII. CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados mostrados en el experimento podemos verificar que la aplicación de NPs de Cu modifica la germinación y el crecimiento de plantas. Para semillas de tomate y chile ancho la aplicación de Cu en forma nano o micro modifica la germinación y el crecimiento de plántulas resultando cambios en vigor, longitud de radícula y longitud de plántula obteniéndose los valores más altos en tratamientos expuestos a NPs de Cu. La aplicación de NPs de cobre modifica la germinación de tomate y chile ancho, en especial la aplicación de 5 ppm de NPs de Cu la cual obtiene regularmente las mejores medias en comparación con el control y la aplicación de sulfato de cobre.

La aplicación de NPs de Cu puede funcionar como promotor de la germinación de semillas de tomate y chile ancho, mientras que las plantas en invernadero en un medio hidropónico a pesar de mostrar cambios en los muestreos finales por la aplicación de Cu ya sea como nano o micro no muestra una tendencia significativa estadísticamente. En cuanto a medias podemos ver que las plantas de tomate y pimiento obtienen las más altas con la aplicación de sulfato de cobre, mientras que las NPs de Cu superan regularmente al control.

Las medias más altas en la aplicación de NPs de Cu haciendo una comparación de los dos métodos los obtenemos con la aplicación directa a raíz. Los resultados nos muestran las diferentes reacciones de las especies de plantas de acuerdo a su etapa fenológica a la aplicación de NPs de Cu, interpretándose una mejora en la germinación y crecimiento de plántulas, mientras que en variables de la etapa vegetativa se obtiene una mejora en comparación con el control, aunque no supera a la aplicación de sulfato de cobre.

En el sector agrícola la nanotecnología tiene un potencial fenomenal para facilitar y enmarcar la siguiente etapa de técnicas de agricultura de precisión. A nivel mundial, muchos países han reconocido el potencial de la nanotecnología en el sector agroalimentario y están invirtiendo una cantidad significativa en ella. La

adopción de la nanotecnología desempeña un papel crucial para una demanda de una población creciente con recursos naturales limitados (Ali *et al.*, 2014).

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aziz, H. M., Hasaneen, M. N. y Omer, A. M. (2016). Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(1), 0902.
- Agrawal, S. y Rathore, P. (2014). Nanotechnology pros and cons to agriculture: A review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 3(3), 43-55.
- Ajrilloo, A. R., Shaaban, M., y Motlagh, Z. R. (2015). Effect of K Nano-Fertilizer and N Bio-Fertilizer on Yield and Yield Components of Tomato (*Lycopersicon Esculentum L.*). *Int. J. Adv. Biol. Biom. Res*, 3(1), 138-143.
- Ali, M. A., Rehman, I., Iqbal, A., Din, S., Rao, A. Q., Latif, A. y Husnain, T. (2014). Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Adv. life sci*, 1(3), 129-138.
- Almeelbi, T., y Bezbaruah, A. (2014). Nanoparticle-sorbed phosphate: iron and phosphate bioavailability studies with *Spinacia oleracea* and *Selenastrum capricornutum*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(7), 1625-1632.
- Azpilicueta, C., Pena, L. y Gallegos, S. (2010). Los metales y las plantas: entre la nutrición y la toxicidad. *Ciencia hoy*, 20(116), 12-16.
- Baudoin, W. O. (2002). El cultivo protegido en el mediterraneo. FAO. 1014-1227.
- Carrillo González, R., y González Chávez, M. D. C. A., (2009). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 2(2).
- Castagnino, J.M. (2006). Nanomateriales y contaminación ambiental. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*, 40(1), 1-2.

Castillo Rodriguez F. D., (2012), introducción a la nanotecnología. UNAM

COFUPRO, (2003). Cadena agroalimentaria del tomate. www.cofupro.org.mx

Coles, D. y Frewer, L. J. (2013). Nanotechnology applied to European food production—A review of ethical and regulatory issues. *Trends in food science & technology*, 34(1), 32-43.

Comité Estatal Sistema Producto Chile, (2015).

<http://sdr.chihuahua.gob.mx/chile/index.php>

Das, B., Debnath, K., Sarkar, K. K., Priya, B., y Mukherjee, S. (2015). Effect of different nanoparticles on germination and seedling growth in tomato. *Research on Crops*, 16(3), 542-550.

Ditta, A. y Arshad, M. (2016). Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition. *Nanotechnology Reviews*.

Dubey, A. y Mailapalli, D. R. (2016). Nanofertilisers, Nanopesticides, Nanosensors of Pest and Nanotoxicity in Agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.

Dubey, A. y Mailapalli, D. R. (2016). Nanofertilisers, Nanopesticides, Nanosensors of Pest and Nanotoxicity in Agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). Springer International Publishing.

El-Temsah, Y. S. y Joner, E. J. (2010). Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. *Environmental toxicology (Noruega)*, 27(1), 42-49.

FAO, (2010). Propuestas de enmiendas a las lista de prioridades para la normalización de frutas y hortalizas frescas.

ftp://ftp.fao.org/codex/meetings/CCFFV/ccffv14/ff14_10s.pdf

Foladori, G., Figueroa, S., Edgard, Z. L. y Invernizzi, N. (2012). Características distintivas del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina. *Sociologias*, 14(30).

Ghahremani, A., Akbari, K., Yousefpour, M. y Ardalani, H. (2014) *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars (IJPRS)*.Iran. 3 (2).

Ghorbani, H. R., Mehr, F. P., y Poor, A. K. (2015). Extracellular synthesis of copper nanoparticles using culture supernatants of *Salmonella typhimurium*.*Oriental Journal of Chemistry*, 31(1), 527-529.

Hussien, M. M., El-Ashry, S. M., Haggag, W. M. y Mubarak, D. M. (2015). Response of Mineral Status to Nano-Fertilizer and Moisture Stress during Different Growth Stages of Cotton Plants.

Joye, I. J., Davidov-Pardo, G. y McClements, D. J. (2014). Nanotechnology for increased micronutrient bioavailability. *Trends in Food Science & Technology*, 40(2), 168-182.

Juarez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Pérez-Labrada, F., Cadenas-Pliego, G. y Benavides-Mendoza, A. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 89.

Kah, M. (2015). Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation? *Frontiers in chemistry*, 3 (64).

- Kalteh, M., Alipour, Z. T., Ashraf, S., Aliabadi, M. M., y Nosratabadi, A. F. (2014). Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *Journal of Chemical Health Risks (Iran)*, 4(3). 49-55.
- Kaviani, B., Ghaziani, M. V. F., y Negahdar, N. (2016). The Effect of Iron Nano-Chelate Fertilizer and Cycocel (CCC) on Some Quantity and Quality Characters of *Euphorbia Pulcherrima* Willd. *Journal of Medical and Bioengineering (Iran)*, 5(1). 44-44.
- Kim, S., Lee, S., y Lee, I. (2012). Alteration of phytotoxicity and oxidant stress potential by metal oxide nanoparticles in *Cucumis sativus*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(5), 2799-2806.
- Lira-Saldívar R. H. y Méndez-Arguello B., (2016). *Agronanotecnología*. CIQA. México. Pág. 8.
- Lira-Saldívar R. H., Hernández-Suárez. M., Corrales–Flores. J., (2014). *Nanotecnología en agricultura sustentable*. CIQA. México. Pág. 38.
- Liu, R., y Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific reports*, 4.
- Liu, R., Zhang, H., y Lal, R. (2016). Effects of Stabilized Nanoparticles of Copper, Zinc, Manganese, and Iron Oxides in Low Concentrations on Lettuce (*Lactuca sativa*) Seed Germination: Nanotoxicants or Nanonutrients? *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1), 1-14.
- López-Moreno, M. L., Avilés, L. L., Pérez, N. G., Irizarry, B. Á., Perales, O., Cedeno-Mattei, Y., y Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of The Total Environment*, 550, 45-52.

- Lowry, G. V., Gregory, K. B., Apte, S. C., y Lead, J. R. (2012). Transformations of nanomaterials in the environment. *Environmental science & technology*, 46(13), 6893-6899.
- Lucero, J. M. y Sánchez, C. (2012). Innovación tecnológica de sistemas de producción y comercialización de especies aromáticas y cultivos de elite en agricultura orgánica protegida con energías alternativas de bajo costo. Proyecto SAGARPA-CONACYT. Impreso en México. Pág. 1 y 3.
- Medina, E. L., Gutiérrez, C. G. y Ayala, R. D. R. (2010). Nanotechnology and nano-encapsulation of pesticides. *Ra Ximhai*, 6(1), 63-67.
- Mendoza Uribe, G. y Rodríguez-López, J. L. (2007). La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles latinoamericanos*, 15(29), 161-186.
- Miralles, P., Church, T. L., y Harris, A. T. (2012). Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants. *Environmental science & technology*, 46(17), 9224-9239.
- Moghaddasi, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Karimzadeh, F. y Chaney, R. (2015). Fate and effect of tire rubber ash nano-particles (RANPs) in cucumber. *Ecotoxicology and environmental safety*, 115, 137-143.
- Parisi, C., Vigani, M. y Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities? *Nano Today (España)*, 10(2), 124-127.
- Pastrana, H. F., Ávila, A., y Moreno, G. (2012). Nanotecnología, patentes y la situación en América Latina. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 5(9).

- Peng, C., Zhang, H., Fang, H., Xu, C., Huang, H., Wang, Y. y Shi, J. (2015). Natural organic matter–induced alleviation of the phytotoxicity to rice (*Oryza sativa* L.) caused by copper oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(9), 1996-2003
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., y Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7(12), 1584-1594.
- Rezaei, M., Daneshvar, M. y Shirani, A. H. (2014). Effect of iron nano chelated fertilizers foliar application on three wheat cultivars in Khorramabad climatic conditions. *Scientific Journal of Crop Science (Iran)*, 3(2), 9-16.
- Red Global MX (2016). Sector Nanotecnología y nuevos materiales. <http://www.redtalentos.gob.mx/>.
- Robles, E., Vinck, D. y De Gortari, R. (2008). Desarrollo de las nanociencias en México: una visión a partir de las publicaciones científicas. In *Nano Mex Conference*.
- Rosenzweig, A. (2005). El debate sobre el sector agropecuario mexicano en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte. CEPAL. México. Pág. 29.
- Safaei, Z., Azizi, M., Davarynejad, G. y Aroiee, H. (2014). The effect of foliar application of humic acid and nanofertilizer (Pharmks®) on yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-Products (Iran)*, 3 (2), 133-140.
- SAGARPA (2015). México, líder mundial en exportación de chile: www.sagarpa.gob.mx.

- Secretaria de Relaciones Exteriores. (2015). México: primer exportador mundial de tomate. <http://consulmex.sre.gob.mx/omaha/images/JITOMATE/jitomate.pdf>
- Shi, J., Peng, C., Yang, Y., Yang, J., Zhang, H., Yuan, X. y Hu, T. (2014). Phytotoxicity and accumulation of copper oxide nanoparticles to the Cu-tolerant plant *Elsholtzia splendens*. *Nanotoxicology*, 8(2), 179-188
- Shivakumar, L., Harsha, V.S. y Shivaprasad, MK (2015). Alcance de la nanociencia y la nanotecnología en la agricultura. *Popular Kheti (Iran)*, 3(1): 136-138.
- Siddiqui, M. H., y Al-Whaibi, M. H. (2014). Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). *Saudi journal of biological sciences*, 21(1), 13-17.
- Siva, G. V. y Benita, L.F.J. (2016). Las The iron oxide nanoparticles promotes Agronomic Traits ginger (*Zingiber officinale* Rosc.). *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci (India)*, 3 (3), 230-237.
- Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N. y Panwar, J. (2015). Nano-fertilizers and Their Smart Delivery System. In *Nanotechnologies in Food and Agriculture (India)*. pp. 81-101.
- Stampoulis, D., Sinha, S. K., & White, J. C. (2009). Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental science & technology*, 43(24), 9473-9479.
- Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., y Rahale, C. S. (2015). Nano-fertilizers for Balanced Crop Nutrition. In *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 69-80). Springer International Publishing
- Takeuchi, N. y Mora Ramos, M. E. (2011). Divulgación y formación en nanotecnología en México. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 4(2).

- Tarafdar, J. C., Raliya, R., Mahawar, H. y Rathore, I. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*, 3(3), 257-262.
- Towell, J. L. (2015). Una Semblanza de las Solanaceae. *ETNOBIOLOGÍA*, 1(1), 17-23.
- US Research Nanomaterials, Inc. (2016). The advanced Nanomaterials Provider. <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/160>
- Villareal, R. L., (1982) Tomates. IICA. Costa Rica. Pág 65.
- Wang, F., Liu, X., Shi, Z., Tong, R., Adams, C. A., y Shi, X. (2016). Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants—A soil microcosm experiment. *Chemosphere*, 147, 88-97
- Wang, Z., Xie, X., Zhao, J., Liu, X., Feng, W., White, J. C., y Xing, B. (2012). Xylem-and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environmental science & technology*, 46(8), 4434-4441.
- Záyago-Lau, E., y Foladori, G. (2010). La nanotecnología en México: un desarrollo incierto. *Economía, sociedad y territorio*, 10(32), 143-178.
- Zhao, L., Hu, J., Huang, Y., Wang, H., Adeleye, A., Ortiz, C., y Keller, A. A. (2016). ¹H NMR and GC–MS based metabolomics reveal nano-Cu altered cucumber (*Cucumis sativus*) fruit nutritional supply. *Plant Physiology and Biochemistry*
- Zuverza-Mena, N., Medina-Velo, I. A., Barrios, A. C., Tan, W., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Copper nanoparticles/compounds impact agronomic and physiological parameters in cilantro (*Coriandrum sativum*). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(10), 1783-1793.

IX. Anexos

Figura 9. Transpiración y fotosíntesis en plantas de pimiento en invernadero. A: transpiración; B: fotosíntesis.

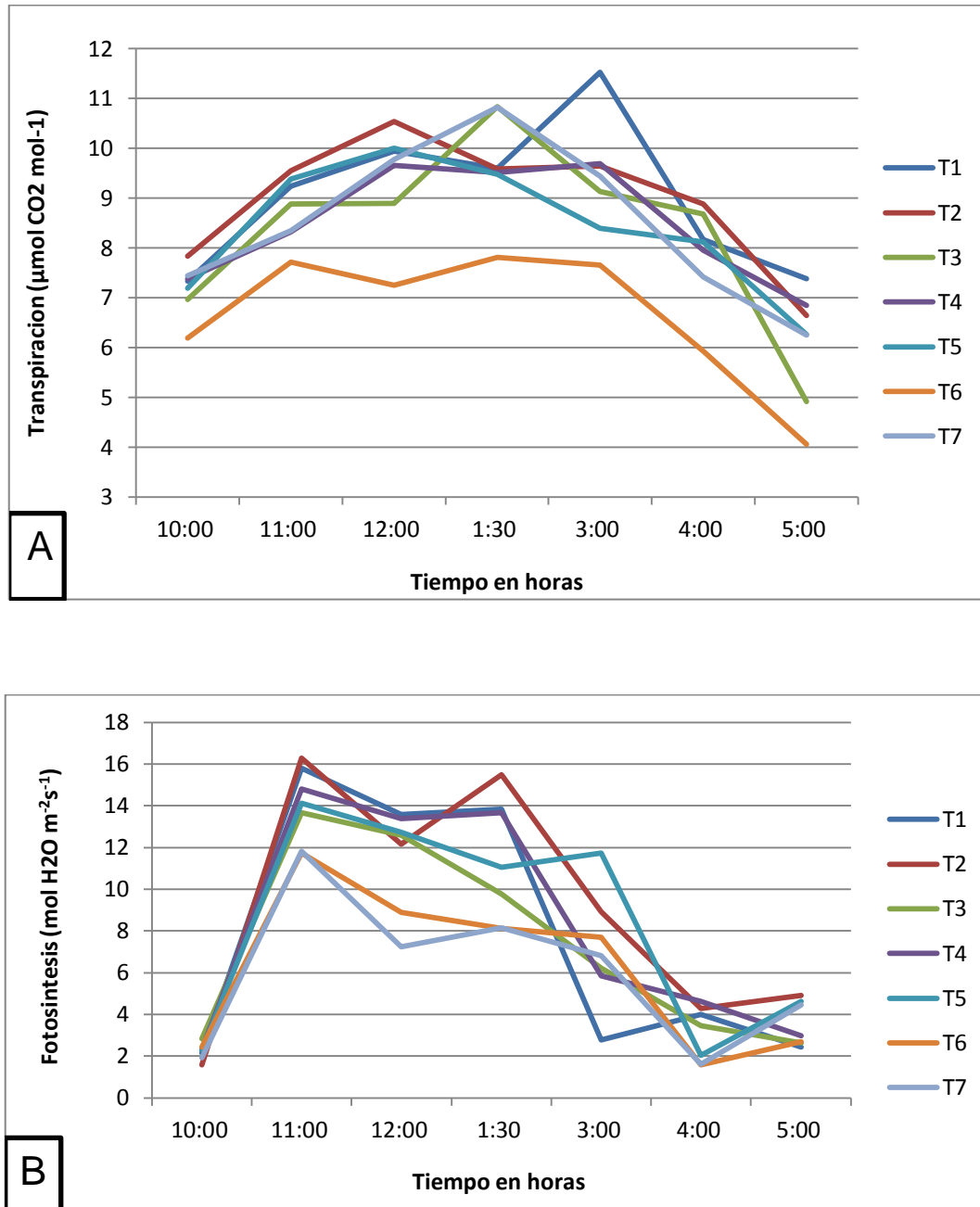
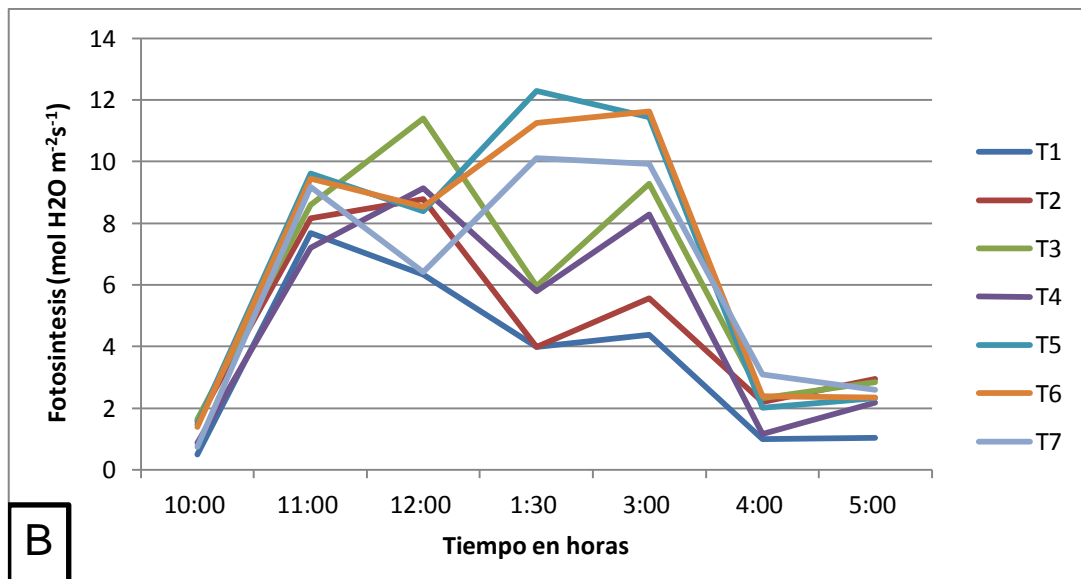
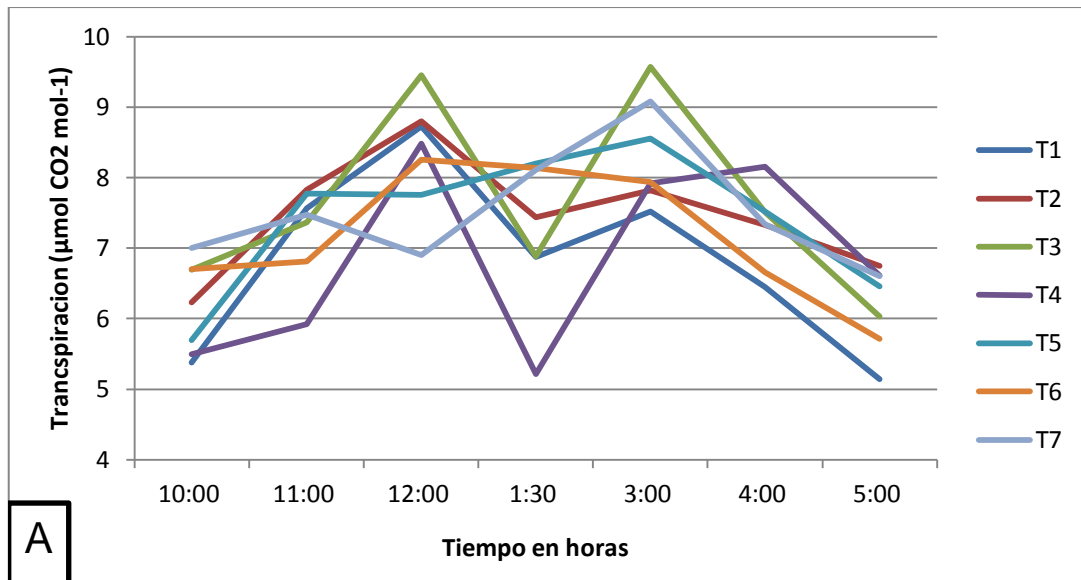


Figura 10. Transpiración y fotosíntesis en plantas de tomate en invernadero. A: transpiración; B: fotosíntesis.



Los datos fueron obtenidos en un día que presentaba nublados parciales y lloviznas frecuentes alrededor de las 12:00 y 3:00 pm, mostrándose una baja para transpiración y fotosíntesis en las plantas.