

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Nanotubos De Carbono (NTC) y su Efecto En La Germinación y Otros
Parámetros Fisiológicos Determinados En Plántulas De Pepino
(*Cucumis sativus*)

Por:

MARÍA DE LA LUZ MARTÍNEZ GONZÁLEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FITOMEJORAMIENTO

Nanotubos De Carbono (NTC) y su Efecto En La Germinación y Otros
Parámetros Fisiológicos Determinados En Plántulas De Pepino
(*Cucumis sativus*)

Por:

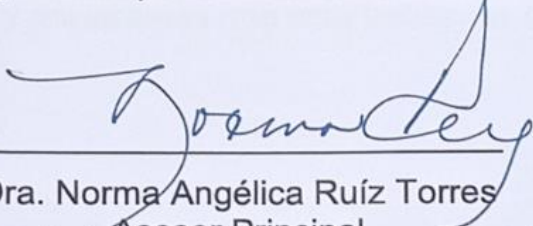
MARÍA DE LA LUZ MARTÍNEZ GONZÁLEZ

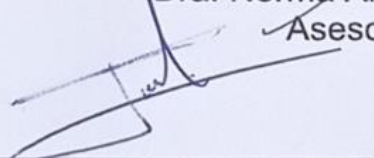
TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

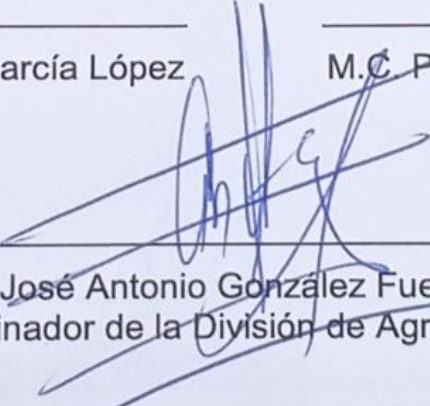
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor Principal


Dr. Josué Israel García López
Coasesor


M.C. Pilar Espitia Hernández
Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México



Diciembre, 2021

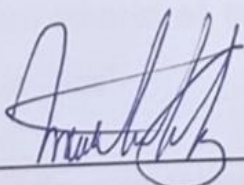
DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Pasante



María de la Luz Martínez González

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por dejarme llegar hasta este momento, por iluminar mí camino, y nunca dejarme caer y/o rendirme ante cualquier adversidad, aumentar mi fe en el transcurso de mi vida, darme la oportunidad de seguir con mis metas y dejarme compartir cada una con mi familia.

A mi alma mater por ser el lugar donde pude adquirir mis conocimientos, por haberme brindado la oportunidad de tener grandiosas experiencias y darme la oportunidad de conocer a excelentes amistades dentro de ella.

A mis padres y hermanos, por darme la oportunidad de estudiar, creer en mis capacidades y apoyarme en todo lo que me he propuesto a realizar a lo largo de mi carrera universitaria y personal.

A mi novio y mejor amigo, por estar conmigo cada día de mi carrera universitaria y vida personal, siempre creer en mí, por motivarme a ser una mejor persona y nunca dejarme sola.

A la Dra. Norma Angélica Ruíz Torres, por darme la oportunidad de realizar esta investigación y apoyarme durante el desarrollo, compartiendo sus conocimientos e instruyéndome a aplicarlos.

A la MC. Pilar Espitia Hernández y Al Dr. Josué Israel García López, por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación, tiempo y compartiendo sus conocimientos.

A C.A.F.E., por ayudarme encontrar a Dios, mientras mis lagrimas cayeron en una taza de café, hombro a hombro hasta el final, y enseñarme a hacer lo justo día con día. “Que ningún enfermo emocional, alcohólico o drogadicto, tenga que morir sin antes haber conocido a Dios”.

A Maria Guadalupe Ríos Mellado, por dejarme entrar a su casa y corazón, y dejarme ser parte de su vida y familia, y por cada uno de esos consejos, abrazos

y apoyo emocional, en cada momento, por dejarme ser su amiga, y poder convivir con esos peques tan lindos.

A Laura Campa de la Luz, por el apoyo incondicional durante mi primer paso en la vida profesional, darme la oportunidad de aplicar mis conocimientos, y sobre todo brindarme la oportunidad de conocer a esa gran persona.

A Vanessa Hernández León, por las risas, las comidas, sueños y lágrimas compartidas en todo momento, y ser ese gran apoyo siempre.

A Luis Jonatan Valenzuela Cruz, por ser ese excelente ser humano y amigo conmigo, dejarme conocerte y por el apoyo en cada una de las materias y sobre todo apoyo emocional, ¡Equipo Alfa Dinamita Lobo por siempre!

A Verenice Duarte Alcocer, por ayudarme desde mis primeros días en Saltillo y ya universidad, por brindarme la oportunidad de conocer y convivir con tu familia.

A Sandra Cecilia Cabral Ramírez, por estar en todo momento y sin dudarlo, por esos abrazos cálidos en día nublados y esa linda mistad aun a distancia.

A mis amigos: Brenda Daniela Cortes Rodríguez y José Antonio Vázquez Rubio, por apoyarme y motivarme a nunca rendirme, a seguir con mis sueños sin importar cual sea la dificultad.

DEDICATORIAS

A mis padres. Maria de Jesús González Hernández y Julio Martínez Galán. Por darme la vida, por no rendirse en ningún momento, por no dejarme caer y siempre sostener mi mano, por escucharme siempre y secar mis lágrimas, por cada una de las enseñanzas de cada uno, porque sin ustedes esto no sería una realidad, por ser los mejores padres que Dios me pudo prestar, es por ustedes, que llego aquí y para ustedes, llegamos a nuestra meta. Los amo, su pequeña por siempre, piquesita.

A mis hermanos. Norberto Martínez González, Julio César Martínez González, María Belem Martínez González y Jesús Martínez González. Por siempre creer en mí y enseñarme lo que es el cariño incondicional, darme esos consejos cuando más los necesito, y por ayudarme a culminar este sueño, que sé que compartimos. Los amo.

A mi abuelita. Juana Hernández Pérez, por creer en mí siempre, por apoyarme en cada uno de mis pasos, es por ti porque te lo prometí. La amo. Su pique.

A mi prima. Angelica Calva, por siempre creer en mí y ese apoyo incondicional en todo momento.

A mi novio y mejor amigo. Alexander Álvarez Molina, por estar conmigo cada día de mi carrera universitaria y vida personal, por siempre creer en mí, por motivarme a ser una mejor persona y nunca dejarme sola, y por qué este sueño lo cumplimos por la gracia de Dios juntos. Que este sea el inicio de un futuro lleno de bendiciones para ambos. Por un futuro juntos. Te amo.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIAS	VI
TABLA DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos	4
III. HIPÓTESIS	5
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1 Nanotecnología.....	6
4.3 Usos de nanotecnología	7
4.4 Aplicación de nanotecnología en agronomía	7
4.5 ¿Qué son las Nanopartículas (NPs)?.....	8
4.6 Efectos de Nanopartículas sobre la germinación de semillas	8
4.7 Nanotubos de Carbono y aplicación en la Agricultura.....	9
4.8 NTC en la germinación de semillas.....	10

V.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
5.1	Ubicación del sitio experimental.....	12
5.2	Material biológico utilizado.....	12
5.3	Preparación de soluciones con Nanotubos de Carbono.....	12
5.4	Imbibición.....	12
5.5	Variables evaluadas en el bioensayo.....	13
5.5.1	Vigor de germinación.....	13
5.5.2	Porcentaje de germinación.....	14
5.5.3	Porcentaje de plántulas anormales.....	14
5.5.4	Longitud de la plúmula y de radícula.....	14
5.5.5	Peso seco de plántulas.....	14
5.6	Diseño experimental y análisis estadístico.....	15
5.6.1	Modelo estadístico.....	15
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
VII.	CONCLUSIONES.....	25
VIII.	LITERATURA CITADA.....	26
IX.	ANEXOS.....	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), tratadas con NTC.	17
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fisiológicas evaluadas en el bioensayo de germinación semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), tratadas con NTC.	18
Cuadro 3. Comparación de medias de las variables fisiológicas evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>).	21
Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), tratadas con NTC.	22
Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables evaluadas en bioensayo de germinación con NTC.	23

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo1: Porcentaje de vigor y germinación generadas en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>) tratadas con NTC a diferentes concentraciones.	31
Anexo 2: Porcentaje de plántulas anormales y semillas sin germinar generadas en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>) tratadas con NTC a diferentes concentraciones.	31
Anexo 3: Peso seco de plántulas normales generadas en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>) tratadas con NTC a diferentes concentraciones.	32
Anexo 4: Longitud de plúmula y radícula generadas en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>) tratadas con NTC a diferentes concentraciones.	32
Anexo 5: Relación Radícula /Plúmula y Plúmula/Radícula generadas en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>) tratadas con NTC a diferentes concentraciones.	33

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de Nanotubos de Carbono (NTC), en semilla de una variedad comercial de pepino (*Cucumis sativus*), sobre la germinación de la semilla y variables relacionadas con la fisiología de plántulas. Se estableció un bioensayo con ocho tratamientos (0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 ppm). Cada tratamiento constó de 100 semillas, dividido en cuatro repeticiones, cada uno de 25. Las semillas se depositaron en cajas de Petri, se aplicó 30 ml de cada concentración de NTC de acuerdo con el tratamiento, dejando de esta manera imbibir durante 24 horas. Después del tratamiento las semillas fueron sembradas entre dos hojas de papel Anchor, humedecidas con anterioridad con agua destilada, siendo estas enrolladas en forma de taco, posterior a la siembra fueron introducidos en bolsas de polietileno, dentro de un contenedor de plástico, y se colocaron en una cámara germinadora a una temperatura de 25°C, fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad, a una humedad relativa de 75%. Mediante un análisis de varianza, se determinaron diferencias estadísticas entre concentraciones (0, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 ppm), así se realizó una comparación de medias, utilizando la Prueba de Tukey ($P \leq 0.01$), con el fin de determinar la eficiencia de cada tratamiento. Los resultados demostraron que la aplicación de NTC a una concentración de 200 ppm, durante el periodo de imbibición en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tuvo efecto positivo en la variable vigor de germinación, teniendo un 17% más de vigor mostrando que la aplicación de NTC es favorable en el proceso de imbibición de las semillas, a concentraciones adecuadas, pueden favorecer su uniformidad, velocidad de germinación, y sobre todo el desarrollo de las mismas en campo, y por ende su calidad, siendo esta una alternativa para la agricultura demandante de la actualidad.

Palabras clave: Nanotecnología, Nanopartículas, Germinación, Vigor, Semilla.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura actual es muy demandante en cada uno de sus procesos, debido a la gran importancia que tiene en el mundo, causado principalmente por el incremento acelerado de la población en las últimas décadas, y para ello es necesario la implementación de nuevas tecnologías.

Para lograr un aumento en la producción agrícola, es necesaria la adopción de tecnologías emergentes, ya que estas ofrecen ventajas en cuanto a tratamientos químicos y físicos, por ejemplo: reducir la cantidad de pesticidas para disminuir el impacto en el medio ambiente y en los seres vivos, ofrecer una baja desviación genética en las semillas, y proteger semillas para un mayor tiempo de vida y evitar alguna infección antes de ser sembradas (Ojha et al., 2021; Rifna et al., 2019).

Es bien sabido que el principal insumo en la agricultura es la semilla, la cual debe cumplir con los atributos de calidad, para tener los mejores resultados en campo, que incluye el Fisiológico, el Físico, el Sanitario y el Genético.

La calidad fisiológica de la semilla abarca la suma de todas las propiedades o características relacionadas con la viabilidad, el vigor y la germinación, las cuales determinan el nivel potencial del comportamiento de las semillas y el establecimiento del cultivo (Velázquez, 2014). Dicha calidad puede mantenerse y mejorarse a través de tratamientos, los cuales son aplicados directamente a la semilla, en precosecha contribuyendo directamente en el proceso germinativo.

La germinación es el proceso fisiológico donde se desarrollan las estructuras indispensables para la formación de la nueva planta (Morales-Santos *et al.*, 2017). El agua, la temperatura, la luz, la composición de la atmósfera son factores externos primordiales que influyen en la germinación dado que son el arranque del metabolismo embrionario, su control en el proceso y el comportamiento y composición espectral (Morales-Santos *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2010)

Para obtener un mayor porcentaje de germinación, podemos visualizar a la nanotecnología, pues en la última década ha incrementado sus aportaciones a diferentes áreas incluyendo la agricultura.

Actualmente la agronanotecnología se define como la ciencia de producir nanopartículas (NPs) y nanoelementos (NE) de materiales diversos para generar productos agrícolas como nanosensores, nanoplaguicidas, nanoherbicidas y nanofertilizantes encapsulados para una liberación controlada (Rodríguez-Fernández, 2016).

El uso de NPs en diferentes cultivos ha evidenciado que incrementan la germinación y crecimiento de plántulas, su actividad fisiológica, la expresión de los genes y el nivel bioquímico de proteínas y enzimas en las plantas, indicando eso así potencial para mejorar de manera sustentable el rendimiento de cultivos agrícolas (Saldívar *et al.*, 2018).

Los nanotubos de carbono (NTC) son nanomateriales ampliamente usados en ciencias biológicas y de materiales, por lo que los NTC de pared simple o de pared múltiple son usados para transportar agua, nutrientes y medicamentos. Como los NTC poseen una extensa superficie, tienen el potencial de regular la humedad bajo condiciones de estrés, por lo que pueden llegar a resolver el problema en sistemas de siembra en temporal. Los efectos positivos de los NTC en el crecimiento y desarrollo de las plantas han sido descritos por varios grupos de investigación, habiendo reportado que incrementan el crecimiento de las raíces en plantas de cebolla y pepino (Cañas *et al.*, 2008), así como de zacate rye grass (Lin y Xing, 2007).

Se ha demostrado que los nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCM) pueden activar el crecimiento de plantas de tomate y afectar a la expresión de genes que son esenciales para la división celular y el desarrollo de la planta (Khodakovskaya *et al.*, 2011; Villagarcía *et al.*, 2012). Sin embargo, es también conocido, que se debe tener una dosis para su aplicación, para evitar alguna reacción adversa, y poder así explotar al máximo el potencial en la semilla. Como

lo mencionan Razzaq *et al.* (2016) “Se requiere la experimentación exhaustiva para establecer la concentración adecuada, el tamaño y la forma de aplicación”.

Actualmente se siguen realizando investigaciones para conocer a profundidad el efecto de estos nanomateriales, para la mejora de la producción mundial. Por lo antes mencionado, se evaluaron diferentes concentraciones de Nanotubos de Carbono (NTCs) en semilla de pepino (*Cucumis sativus*), y de esta manera observar el efecto, sobre su germinación y fisiología de plántulas, mediante la imbibición de las semillas en suspensiones de NTCs, para obtener una mejora en los procesos de germinación, desarrollo de plántulas y acumulación de materia seca en (*Cucumis sativus*).

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de Nanotubos de Carbono (NTC), en semilla de pepino (*Cucumis sativus*), sobre el vigor, la germinación y la fisiología de plántulas.

2.2 Objetivos específicos

Determinar la respuesta de la germinación y desarrollo de plántulas, a la aplicación de NTC durante la imbibición de semillas de *Cucumis sativus*,

Determinar si existen diferencias en la expresión del vigor de germinación y de la acumulación de materia seca en plántulas de *Cucumis sativus*, como respuesta a la aplicación de diferentes concentraciones de NTC a semillas.

III. HIPÓTESIS

H_i: La aplicación de NTC a semillas de *Cucumis sativus*, en la fase de imbibición, tiene un efecto positivo sobre el vigor, la germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de materia seca.

H₀: La aplicación de NTC a semillas de *Cucumis sativus*, en la fase de imbibición, no tiene efecto sobre el vigor, la germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de materia seca.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Nanotecnología

La nanotecnología (NT) es un extenso campo de la investigación interdisciplinaria, ya que con ella se abre un amplio abanico de oportunidades en diversas áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sustentable (Prasad *et al.*, 2014). En la agricultura moderna sustentable la NT apunta a aportar soluciones usando nanopartículas (NPs), las cuales poseen tres mecanismos principales de acción: 1) generación de especies reactivas de oxígeno, 2) liberación de iones, y 3) acumulación o penetración de la membrana celular (Alvarado *et al.*, 2014 y Resham *et al.*, 2015). La tendencia es formular productos con ingredientes activos de tamaño nanométrico, lo cual los hace más eficientes y de fácil disponibilidad, además de minimizar las pérdidas al aplicar el producto (Ruiz Torres *et al.*, 2016).

En términos sencillos, se refiere a la tecnología practicada sobre los materiales a nivel molecular (Lira y Méndez, 2018).

4.2 Origen de la nanotecnología

Los orígenes de la nanotecnología (NT) obtenidos por el físico estadounidense Richard Phillips Feynman, ganador del premio Nobel de Física, en 1959, ante la Sociedad Americana de Física, impartiendo la conferencia “Hay mucho sitio en el fondo”. En aquella conferencia, Feynman propuso manipular y fabricar artefactos con la precisión de unos pocos átomos, a pesar de dicho razonamiento, esas ideas permanecieron estancadas por mucho tiempo (Hulla *et al.*, 2015).

Las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento debido a sus beneficios potenciales, los cuales incluyen desde la mejora en la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas, hasta un mejor procesamiento y mayor valor nutricional de los mismos (Dasgupta *et al.*, 2015)

Entre los avances de la NT para la agricultura se pueden destacar los siguientes: encapsulamiento de ingredientes activos como fertilizantes, herbicidas, fungicidas, insecticidas y nutrientes, los cuales se pueden incorporar en matrices de liberación lenta o controlada en materiales naturales como la zeolita (Lateef *et al.*, 2016).

4.3 Usos de nanotecnología

La NT es un campo de investigación con un enorme potencial de innovación para la resolución de los problemas actuales en áreas tan contrastantes como la medicina, la electrónica, la remediación ambiental, la producción de energía, los textiles o los cosméticos (Camarillo *et al.*, 2019).

La NT tiene también el potencial de revolucionar los sistemas agroalimentarios, a través de la utilización eficiente del agua, la protección contra insectos y enfermedades, proporcionando nuevas herramientas para la biología molecular y celular, creando nuevos materiales para la detección y protección del medio ambiente. Esta observación se centra en las estrategias modernas utilizadas para el manejo del agua, el uso de pesticidas sintéticos tradicionales y el potencial de los nanomateriales en la agricultura sustentable como un enfoque moderno en la nueva revolución verde (Lira-Saldivar *et al.*, 2014).

4.4 Aplicación de nanotecnología en agronomía

En la actualidad la NT ha generado interés en el desarrollo de productos de uso agrícola, ya que representa una oportunidad para disminuir el uso de agroquímicos sintéticos, con la posibilidad de reducir el impacto ambiental que se ha venido dando en las últimas décadas. Es así como la NT aplicada a la agricultura tiene por objetivo formular productos con ingredientes activos de tamaño nanométrico, lo cual los hace más eficientes y de fácil disponibilidad, además de minimizar las pérdidas al aplicar el producto (Ruíz-Torres *et al.*, 2016).

Chinnamuthu y Boopathi (2009) indican las diversas áreas de aplicación de la NT en la agricultura: 1. Almacenamiento de energía, producción y conversión

(módulos fotovoltaicos), 2. Incremento de la productividad agrícola (zeolitas nanoporosas para la liberación prolongada y eficiente de fertilizantes), 3. Nanocápsulas para la liberación puntual de pesticidas, 4. Nanosensores para monitorear la calidad del suelo y la vitalidad de la planta, 5. Nanosensores para la detección de plagas y de fitopatógenos y 6. Uso como pesticidas.

4.5 ¿Qué son las Nanopartículas (NPs)?

Las NPs son materiales orgánicos, inorgánicos o híbridos con al menos una de sus dimensiones que van de 1 a 100 nm (a nanoescala). Las NPs que existen en el mundo natural pueden producirse a partir de procesos de reacciones fotoquímicas, erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión, plantas y animales o incluso por los microorganismos (Dahoumane *et al.*, 2017).

Son partículas microscópicas de tamaño menor a 100 nm en forma de nanopolvos, nanoracimos o nanocristales,. Hoy, las NPs son un área de intensa investigación científica debido a una amplia variedad de aplicaciones potenciales en los campos de la biomedicina, óptica electrónica, en la agricultura y la industria de alimentos (Kulkarni *et al.*, 2015).

Los investigadores señalan tanto efectos positivos, como negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas al utilizar NPs y el impacto de estas depende de la composición, concentración, tamaño y propiedades químicas y físicas, así como, la especie de planta (Ma *et al.*, 2010)

Las NPs, dependiendo de sus propiedades, interactúan con las plantas provocado diversos cambios morfológicos y fisiológicos. La eficiencia de las NPs está determinada por su composición química, tamaño, cubierta de la superficie, reactividad, y lo más importante, la dosis a la cual son efectivas (Khodakovskaya *et al.*, 2012).

4.6 Efectos de Nanopartículas sobre la germinación de semillas

Savithamma *et al.* (2012) demostraron que la tasa de germinación de semillas tratadas con NPs de plata fue 28 % mayor que la del control. De acuerdo con los autores, la contribución de las NPs fue facilitar el movimiento de agua y

nutrientes a través de la cubierta de la semilla para acelerar la germinación de semillas y crecimiento de plántulas.

Los resultados obtenidos por Ghavam *et al.* (2018), mostraron que las nanopartículas de plata aumentaron el porcentaje de germinación de *Thymus vulgaris* bajo condiciones de estrés por salinidad, encontrando que la tasa de germinación y la longitud de la raíz se mejoraron con la aplicación de 10 mm/L de nano-plata.

Asimismo, estudios realizados por Ruiz Torres *et al.* (2017), indicaron que al imbibir semillas de *Cucurbita pepo* var. Grey zucchini con NPs compuestas por Zn+Fe (NPsZnOFe) por 48 horas a una concentración de 10 ppm, promueve de manera positiva el vigor de germinación y la longitud de tallo, por otro lado, imbibir semillas de la variedad anteriormente mencionada a una concentración de 5 ppm, presenta un efecto similar, incrementando el vigor de germinación y la longitud de la radícula.

Mushtaq (2011) estudió el efecto de Fe_3O_4 , TiO_2 y NPs de carbón en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), en la tasa de germinación, elongación de la semilla, e índice de germinación. Usaron concentraciones de 0 a 5000 $\mu\text{g/ml}$, encontraron reducción en el desarrollo de la raíz y en menor grado en el porcentaje de germinación

4.7 Nanotubos de Carbono y aplicación en la Agricultura

Actualmente, los nanotubos de carbono (NTC) son considerados como una nueva forma de carbono puro, como hojas enrolladas de grafito con una red hexagonal unida por átomos de carbonos, las cuales existen de dos tipos: de pared simple, pareciendo ser como un cilindro y de paredes múltiples o multiparedes, consistiendo en muchos cilindros anidados, cuyos radios sucesivos difieren en el espacio entre capas de grafito (Ayutsede *et al.*, 2006).

Los nanotubos de carbono (NTC) son nanomateriales ampliamente usados en ciencias biológicas y de materiales, por lo que los NTC de pared simple o de pared múltiple son usados para transportar agua, nutrientes y medicamentos.

Como los NTC poseen una extensa superficie, tienen el potencial de regular la humedad bajo condiciones de estrés, por lo que pueden llegar a resolver el problema en sistemas de siembra en temporal.

Los NTC promueven el crecimiento de las plantas debido a que se comportan como canales de agua similares a las acuaporinas, lo que promueve mayor presión hidrostática dentro de las células; induciendo absorción de agua, flujo de nutrientes y por consiguiente mayor crecimiento de la planta (Lira y Méndez, 2018)

Poseen una correcta combinación de propiedades: un diámetro nanométrico, integridad estructural, alta conductividad eléctrica y estabilidad química, lo cual los hace que tengan múltiples usos potenciales incluyendo en células vegetales y, por ende, en las plantas cultivadas (Serag *et al.*, 2011).

En el campo de la agricultura, los NTC han sido utilizados para promover el crecimiento de las plantas, tal como lo demostró Cañas *et al.* (2008) al estudiar su efecto en seis especies de plantas (repollo, zanahoria, pepino, lechuga, cebolla y tomate). Ellos encontraron que los NTC de pared sencilla estimularon el crecimiento de algunas de esas especies. Otros resultados han sido generados por investigadores de la Universidad de Arkansas en el Centro de Nanotecnología de Little Rock, Arkansas, E.E.U.U., quienes han descubierto que células de plantas de tabaco se desarrollan con mayor velocidad (Khodakovskaya *et al.*, 2012), debido al efecto de los NTC multiparedes (NTCPM).

4.8 NTC en la germinación de semillas

La primera evidencia de efectos positivos de los NTCPM en plantas de cultivo fue reportada por Khodakovskaya *et al.* (2009), quienes usaron soluciones de riego a concentraciones variables de 10 a 40 mg L⁻¹. A partir de sus resultados pudieron observar que los NTCPM tienen la capacidad de penetrar las semillas de tomate, provocando un aumento en las tasas de geminación y estimulando el crecimiento en plántulas jóvenes.

Otros estudios demostraron que la aplicación de una concentración adecuada de nanotubos aumenta la longitud de las raíces en *Brassica juncea* (Ghodake *et al.*, 2010) y el crecimiento de estas en plantas de cebolla y pepino (Cañas *et al.*, 2008).

Por otro lado, la exposición de semillas de tomate a estos NTC hace que las semillas germinen más rápido y que las plantas de esta hortaliza crezcan más y alcancen mejores rendimientos (Khodakovskaya *et al.*, 2013).

Duarte García(2018) menciona que los NTC a una concentración de 200 ppm, aplicadas durante el periodo de imbibición en semillas de calabaza (*Cucurbita pepo*), tienen un efecto positivo en la variable vigor de germinación, demostrando tener el potencial para ser utilizados como promotoras del crecimiento, puesto que tienen efecto positivo al incrementar el índice de vigor en 6% con respecto al testigo (0 ppm), así como una concentración de 50 ppm incrementaron el porcentaje de germinación en 5 %, con respecto al testigo, así como la longitud de vástago en 0.61 cm.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Ubicación del sitio experimental

El bioensayo se desarrolló en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), situada geográficamente a 25° 22'06.84" Latitud norte, Longitud Oeste de 101°01'49.58', con altura de 1784 msnm, en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

5.2 Material biológico utilizado

Se utilizó semillas de pepino (*Cucumis sativus*), de una variedad comercial, proporcionada por el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

La variedad era moderadamente vigorosa y adaptable a diversas condiciones climáticas. Frutos monoicos, 19 x 6 cm, de forma cilíndrica y color verde oscuro, con porcentaje de germinación de 90% (de acuerdo con las especificaciones de la etiqueta).

5.3 Preparación de soluciones con Nanotubos de Carbono

Se establecieron cuatro repeticiones para cada concentración (Testigo, 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 ppm).

Se pesó el producto de acuerdo con la concentración deseada, en una balanza analítica (AND modelo HR-200), y se colocaron en tubos tipo Falcon, aforando con agua destilada a 50 ml. Se colocó cada tubo durante un periodo de 5 minutos en un Sonicador Banson (AS2060B Ultrasonic Cleaner) en dos tiempos, 15 y 20 min para para lograr la máxima dispersión de los NTC.

5.4 Imbibición

Se establecieron 8 tratamientos (0 (testigo), 50, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 ppm), y cuatro repeticiones de 25 semillas cada una.

Se esterilizaron con algodón y alcohol 8 cajas de Petri, en donde se colocaron 100 semillas en cada una, se aplicaron 30 ml de suspensión de NTC, por tratamiento. Posteriormente se dejaron imbibiendo las semillas durante 24 horas, dentro de una cámara bioclimática a 25 °C.

Pasando las 24 horas, se procedió a la siembra utilizando el método “entre papel” (ISTA, 2004), utilizando papel Anchor. Cada hoja de papel Anchor, se humedeció con agua destilada, con ayuda de pinzas de disección se colocaron 25 semillas en hilera por repetición, dejando 2.5 cm de ambos lados y aproximadamente 8 cm en la parte superior. Se colocó una segunda capa de papel Anchor encima de las semillas, y se envolvió en forma de taco, dicho proceso se repitió para cada repetición de su respectivo tratamiento.

Posteriormente los tacos con las semillas se colocaron en bolsas de polietileno transparente, siendo etiquetadas y con el embrión hacia abajo, se acomodaron en un recipiente de plástico de forma vertical, para su posterior ubicación en una cámara bioclimática marca Thermo Scientific a una temperatura de 25°C y un fotoperiodo 16/8 h, luz/obscuridad.

5.5 Variables evaluadas en el bioensayo

Porcentaje de vigor de germinación (%), porcentaje de germinación (%), porcentaje de plántulas anormales (%), porcentaje de semillas sin germinar, longitud de plúmula (cm), longitud de radícula (cm), peso seco de plántulas (mg/plántula), e índice de LR/LP y LP/LR.

5.5.1 Vigor de germinación

Pasados cuatro días después de la siembra, se realizó el conteo de plántulas normales. Este conteo fue para obtener el vigor de la semilla, es decir la capacidad de germinación y uniformidad, en cual se ve reflejado en el desarrollo de plántulas, el resultado fue expresado en porcentaje.

5.5.2 Porcentaje de germinación

Al octavo día se determinó el número de plántulas normales, las cuales representan porcentaje de germinación (GER), son consideradas normales aquellas que poseen todas sus estructuras (radícula y tallo y/o plúmula), hipocótilo sin daños en tejidos, un cotiledón en monocotiledóneas y dos cotiledones en dicotiledóneas sin ninguna anomalía o deformación, bajo condiciones óptimas de luz, agua, aire y temperatura.

5.5.3 Porcentaje de plántulas anormales

Son plántulas dañadas que no cuentan con alguna de las estructuras esenciales o en su defecto están mal e irreparablemente dañadas, de tal modo que no se espera un desarrollo balanceado de ellas. También plántulas deformadas o desequilibradas, que han tenido un desarrollo débil, alteraciones fisiológicas o presentan estructuras esenciales deformes o desproporcionadas. Plántulas podridas, que tienen estructuras esenciales enfermas o podridas, debido a una infección primaria, lo cual evita un desarrollo normal. Incluye plántulas fracturadas.

5.5.4 Porcentaje de semillas sin germinar

La contabilización de semillas sin germinar (SSG), es basada en la incapacidad de poder emerger, plúmula o radícula de la semilla, incluyendo aquellas semillas duras o muertas, el resultado se expresó en porcentaje.

5.5.4 Longitud de la plúmula y de radícula

En todas las plántulas normales, se determinó la longitud de plúmula (LP) y la longitud de radícula (LR), con la ayuda de tabla milimétrica, expresándose en cm.

5.5.5 Peso seco de plántulas

El peso seco (PS) de plántulas normales, se inició con la colocación de todas las plántulas normales de cada repetición (taco) en una bolsa de papel estraza,

previamente etiquetadas, estas se introdujeron en una estufa marca Riosa H-48, durante 24 horas a 72 °C. Pasado dicho tiempo se extrajeron de la estufa, y se colocaron dentro de en un desecador, que ayudo a evitar que las muestras adquieran humedad del ambiente, después se pesaron en una balanza analítica marca Precisa BJ610C, el resultado fue expresado en mg/plántula.

Índices de crecimiento (LP/LR y LR/LP). Para su determinación se usaron las longitudes de plúmula y radícula, obteniendo el cociente respectivo.

5.6 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue un completamente al azar, para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos, se realizaron comparaciones de medias, por medio de la Prueba de Tukey, utilizando el paquete estadístico SAS (2004).

5.6.1 Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Valor observado.

μ = Media.

τ_i = Efecto de los tratamientos.

ε_{ij} = Error experimental.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadros 1 y 2), en el bioensayo de semilla de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con nanotubos de carbono (NTC), indican que en las variables porcentaje de vigor de germinación, peso seco de plántula, longitud de plúmula, índice LR/LP, se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre tratamientos. Mientras que para las variables porcentaje de germinación e índice LP/LR, se obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Por el contrario, para las variables, plántulas anormales, porcentaje de semillas sin germinar no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Los resultados del bioensayo demuestran que la aplicación de NTC, tienen efecto positivo en algunas de las variables evaluadas dentro del mismo, aportando de esta manera a la calidad fisiológica de las semillas, pues estas variables están ligadas a la misma calidad, teniendo un efecto directo en el proceso de germinación.

Ratnikova *et al.* (2015) evaluaron la sonicación de semillas en conjunto con nanotubos de carbono de pared múltiple (NTPM) (50 mg L^{-1}), en semillas de tomate, y reportaron aumentos en la germinación de semillas, crecimiento de raíces, y mayor biomasa.

Lo anterior indicia que las respuestas a la aplicación de NTC son efectivas, existiendo diferentes respuestas fisiológicas en las plantas expuestas a los nanomateriales de carbono (CNMs), esto podría deberse a las distintas propiedades de los CNMs (López *et al.*, 2021).

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC.

FV	GL	VIGOR (%)	GERMINACIÓN (%)	PA (%)	SSG (%)
Concentración	7	213.07**	63.71*	29.64 NS	49.64 NS
Error	24	54.16	20.0	37.16	28.16
Total	31	72.7	83.71	66.8	77.8
C.V. %		27.38	5.43	79.95	52.41

** = Significativo al 0.01% de probabilidad; * = Significativo al 0.05% de probabilidad; FV = Fuente de variación; GL= Grados libertad; GER = Germinación; PA = Plántulas anormales; SSG = Semillas sin germinar.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fisiológicas evaluadas en el bioensayo de germinación semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC.

FV	GL	PS (mg/plántula)	LP (cm)	LR (cm)	LR/LP	LP/LR
Concentración	7	14.87**	2.13**	0.66NS	0.034**	0.012*
Error	24	1.97	0.45	1.16	0.009	0.003
Total	31	16.84	2.58	1.82	0.043	0.015
C.V. %		10.11	9.20	11.23	7.39	7.86

** = Significativo al 0.01% de probabilidad; * = Significativo al 0.05% de probabilidad; FV = Fuente de variación; GL= Grados libertad; PS= Peso seco de plántula; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; LR/LP=Relación longitud radícula y longitud de plúmula; LP/LR= Relación longitud de plúmula y longitud de radícula.

En el Cuadro 3 se muestra la comparación de medias entre tratamientos, para variables fisiológicas de la prueba de germinación, donde se observó que para la variable porcentaje de vigor de germinación, las concentraciones de 200 y 400 ppm, fueron las que demostraron mejores resultados con 36% y 34%, en comparación con el testigo, que tuvo un 19%, y ambas concentraciones se encuentran en el mismo grupo estadístico, lo anterior indica que al imbibir las semillas en NTC, la respuesta fisiológica fue diferente, incrementando el porcentaje de semillas germinadas al quinto día (Cuadro 3, y Anexo 1).

El incremento en el porcentaje de vigor podría atribuirse principalmente a la penetración de los NTC en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo (Ruíz-Torres *et al.*, 2016).

El vigor en términos sencillos es el potencial que tiene la semilla para germinar y establecerse de manera uniforme aun en condiciones desfavorables. “El vigor en las semillas es el potencial biológico de esta que favorece el establecimiento rápido y uniforme bajo condiciones, incluso desfavorables de campo” (González *et al.*, 2008). Sin embargo, Hernández (2012) menciona que la semilla presenta su más alto nivel de vigor y potencial germinativo, cuando alcanza la madurez fisiológica.

El incremento en el porcentaje de vigor podría atribuirse principalmente a la penetración de nanomateriales en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo (Ruíz-Torres *et al.*, 2016).

Para la variable porcentaje de germinación, la concentración de 50 ppm mostró un mayor porcentaje con un 90%, lo cual lo hace estar arriba del testigo por un 8% más (Cuadro 3 y Anexo 1).

Duarte García (2018) durante su investigación observó que los NTC a una concentración de 200 ppm, aplicadas durante el periodo de imbibición en

semillas de calabaza (*Cucurbita pepo*), presentaron un efecto positivo en la variable vigor de germinación, demostrando tener el potencial para ser utilizados como promotoras del crecimiento, puesto que tienen efecto positivo al incrementar el índice de vigor en 6% con respecto al testigo (0 ppm), así como una concentración de 50 ppm incrementaron el porcentaje de germinación en 5%, con respecto al testigo.

Khodakovskaya *et al.* (2009) encontraron que los NTC penetraron las semillas de tomate y afectaron su germinación y tasa de desarrollo. El porcentaje de germinación se incrementó al aplicar NTC (10-40 mg/mL) en comparación al testigo. Métodos analíticos indicaron que los NTC pueden penetrar la testa y apoyar la absorción de agua al interior de las semillas, proceso que puede afectar la germinación y desarrollo de plántulas de tomate.

En contraste Saeid y Hojjat (2016), mencionan que la aplicación de NPs de plata no influyó sobre la germinación en semillas de genotipo de lentejas.

En cuanto a las variables plántulas anormales, semillas sin germinar y longitud de radícula, no mostraron diferencias estadísticas, siendo la concentración de 200 ppm con el menor porcentaje de PA (5%), respectivamente. Para longitud de radícula se obtuvo una media de 9.59 cm (Cuadro 3 y 4, y Anexos 2, 4).

En lo que respecta a la variable peso seco de plántula, se observó que, al aplicar una concentración de 400 ppm, se obtuvo el mayor valor (16.05 mg/plántula⁻¹), sin embargo, estadísticamente no existió una diferencia con el testigo pues pertenecen al mismo grupo estadístico, dicha diferencia entre ambas es de 2.59 mg/plántula (Cuadro 4 y Anexo 3).

El Cuadro 4 muestra que en la variable longitud de plúmula, si existe una diferencia entre el testigo y la concentración de 100 ppm, el cual tuvo un incremento de 1.8 cm con respecto al testigo (Anexo 4).

Trabajos desarrollados en diversas especies de plantas confirman que al menos las NPsZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2015).

La relación LR/LP tuvo un efecto positivo a la aplicación de 1000 ppm de NTC, teniendo un incremento respecto al testigo de 0.18, en la relación LP/LR, se observó que la concentración 100 ppm, tuvo un incremento de 0.11 respecto al testigo (0 ppm) (Cuadro 4, y Anexo 5).

Cuadro 3. Comparación de medias de las variables fisiológicas evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*).

Concentración	VIGOR	GERMINACIÓN	PA	SSG
	(%)	(%)	(%)	(%)
0	19 ab	82 ab	11 a	7 a
50	28 ab	90 a	6 a	4 a
100	29 ab	81 ab	9 a	10 a
200	36 a	83 ab	5 a	12 a
300	14 b	83 ab	7 a	10 a
400	34a	84 ab	7 a	11 a
500	29 ab	77 b	12 a	11 a
1000	26 ab	78 b	6 a	16 a
Media	27	82	10	11
Tukey	17.23	10.47	14.27	12.42

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey = 0.05). GER = Germinación; PA = Plántulas anormales; SSG = Semillas sin germinar.

Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC.

Concentración	PS (mg/plántula)	LP (cm)	LR (cm)	LR/LP	LP/LR
0	13.56 a	6.63 bc	8.78 a	1.32 ab	0.75 ab
50	15.97 a	7.43 abc	9.78 a	1.31 ab	0.76 ab
100	13.61 a	8.43 a	9.86 a	1.71 b	0.86 a
200	10.04 b	7.32 abc	9.78 a	1.33 ab	0.74 ab
300	13.46 a	7.88 ab	9.79 a	1.23 b	0.81 ab
400	16.05 a	7.57 abc	9.78 a	1.28 ab	0.77 ab
500	15.11 a	7.54 abc	9.81 a	1.3 ab	0.77 ab
1000	13.27 ab	6.06 c	9.10 a	1.50 a	0.66 b
Media	13.88	7.36	9.59	1.31	0.76
Tukey	3.28	1.58	2.52	0.22	0.14

Valores con la misma literal dentro de una columna son estadísticamente iguales (Tukey = 0.05). PS=Peso seco de plántula, LR= Longitud de radícula, LP=Longitud de plúmula, LR/LP = Relación longitud radícula y longitud de plúmula, LP/LR = Relación longitud plúmula y longitud de radícula.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables evaluadas en bioensayo de germinación con NTC.

NTC	Vigor	PA	SSG	PS	LP	LR	LP/LR	LR/LP
GER	0.10014	-0.49652 **	-0.43656 *	-0.04872	0.14690	0.01772	0.15752	-0.2296
Vigor		-0.13556	0.04526	-0.09542	0.12607	0.47086 **	-0.38052 *	0.33934
PA			-0.56419 **	0.35678 *	-0.08939	-0.0444	-0.05498	0.34450
SSG				-0.32344	-0.04707	0.03024	-0.09285	0.17213
PS					0.2030	0.04481	-0.00314	0.00109
LP						0.67265 **	0.54855 *	-0.55144 *
LR							-0.24734	0.23673
LP/LR								-0.98753 **

**= Correlación significativa al 0.01% de probabilidad; * = Correlación Significativa al 0.05% de probabilidad; GER = Germinación; PA = Plántulas anormales; SSG = Semillas sin germinar; PS=Peso seco de plántula; LR= Longitud de radícula; LP=Longitud de plúmula, LR/LP = Relación longitud radícula y de plúmula, LP/LR = Relación longitud plúmula y de radícula.

El Cuadro 5 muestra las correlaciones entre las variables evaluadas de acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson, negativa y significativa entre GER y PA ($r = -0.49652^{**}$), PA y SSG ($r = -0.56419^{**}$) y GER y SSG ($r = -0.43656$). Por otra parte, la relación entre VIGOR y LR resultó altamente significativa ($r = 0.47086^{**}$), por lo tanto, la correlación con el índice LP/LR resultó negativo ($r = -0.38052$), ya que este indica la proporción de crecimiento de la plúmula con respecto a la raíz.

De acuerdo con el coeficiente de correlación, la variable LP tiene una relación positiva con las variables LR ($r = 0.67265^{**}$) y LP/LR ($r = 0.54855^{*}$), sin embargo, presentó una correlación negativa con el índice LR/LP ($r = -0.55144^{*}$).

De acuerdo con los coeficientes de correlación, se observó un vínculo positivo entre variables relacionadas con la calidad fisiológica de las semillas. La calidad de la semilla es un concepto múltiple que involucra todas aquellas características que determinan su valor para la siembra (Hampton, 2002). Mientras que, la calidad fisiológica se refiere a la viabilidad de las semillas o al potencial que éstas tienen para la germinación, incluyendo el vigor, como resultado de la expresión de factores propios del genoma de la variedad (Basra, 1995).

VII. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en el bioensayo permiten concluir que los NTC a una concentración de 200 y 400 ppm, aplicadas durante el proceso de imbibición por 24 horas, en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tiene un efecto positivo en la variable vigor de germinación, teniendo un 17% y 15% respectivamente más que el testigo (0ppm), de esta manera, pueden considerarse promotores del metabolismo celular.

Los NTC a una concentración de 50 ppm, aumentaron el porcentaje de germinación con un 8%, respecto al testigo (0ppm), e incrementó la acumulación de materia seca.

Mayor peso seco se obtuvo al aplicar 400 ppm, sin embargo, estadísticamente pertenece al mismo grupo que la mayoría de las concentraciones a excepción de 200 ppm, quien tuvo el menor peso seco.

Respecto a la longitud de plúmula, la concentración con mayor valor y efecto positivo fue de 100 ppm, teniendo una diferencia de 1.8 cm con respecto al testigo.

Respecto a la relación longitud raíz/longitud de plúmula, la concentración de 1000 ppm tuvo los mejores resultados para el desarrollo de raíz. Sin embargo, para el desarrollo de plúmula, la imbibición semillas con NTC a 100 ppm, presentó el valor más alto.

Las semillas al ser sometidas a un proceso de imbibición con NTC en suspensión son favorecidas en su porcentaje de vigor y germinación, así como el desarrollo y crecimiento de plúmula.

Los resultados demuestran que la aplicación de NTC durante la imbibición impacta positivamente, favoreciendo la expresión del vigor y la germinación, y por ende los atributos de calidad de las semillas, siendo esta una alternativa para la agricultura demandante de la actualidad, como un nuevo agroinsumo, al ser aplicado a semillas en pequeñas cantidades.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alvarado, R., F. Solera and J.R. Vega-Baudrit. 2014. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y de plata estabilizadas con quitosano. Evaluación de su actividad antimicrobiana. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(3): 134-148.
- Ayutsede, J., Gandhi, M., Sukigara, S., Ye, H., Hsu, C., Gogotsi, Y., and Ko, F. 2006. Carbon nanotube reinforced Bombyx mori silk nanofibers by the electrospinning process. *Biomacromolecules*, 7(1), 208-214.
- Basra, A. S. 1995. *Seed Quality: Basic Mechanisms and Agricultural Implications*. Food Products Press. New York, United States of America. 389 p.
- Camarillo A., E, Blome Fernández, R., Castellanos Andrade, P. I., and Campos Delgado, J. 2019. Mitos y realidades de la nanotecnología en México. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 12(22) Epub 15 de junio de 2020. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.65023>.
- Cañas, J., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., and Olszyk, D. 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9), 1922-1931.
- Chinnamuthu, C.R. and M. Boopathi. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. *Tamil Madras Agric. J* 96(1-6):17-31.
- Dahoumane, S.A., Jeffryes, C., Mechouet, M., and Agathos, S.N. 2017. Biosynthesis of inorganic nanoparticles: A fresh look at the control of shape, size, and composition. *Bioengineering*. 4(1):14
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R., and Kumar, A. 2015. Nanotechnology in agro food: from field to plate. *Food Research International*, 69, 381-400.
- Duarte García, D.L. 2018. Nanotubos de carbono (NTC) y su efecto en el vigor de germinación y otros parámetros determinados en plántulas de calabaza (*Cucurbita pepo*). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.

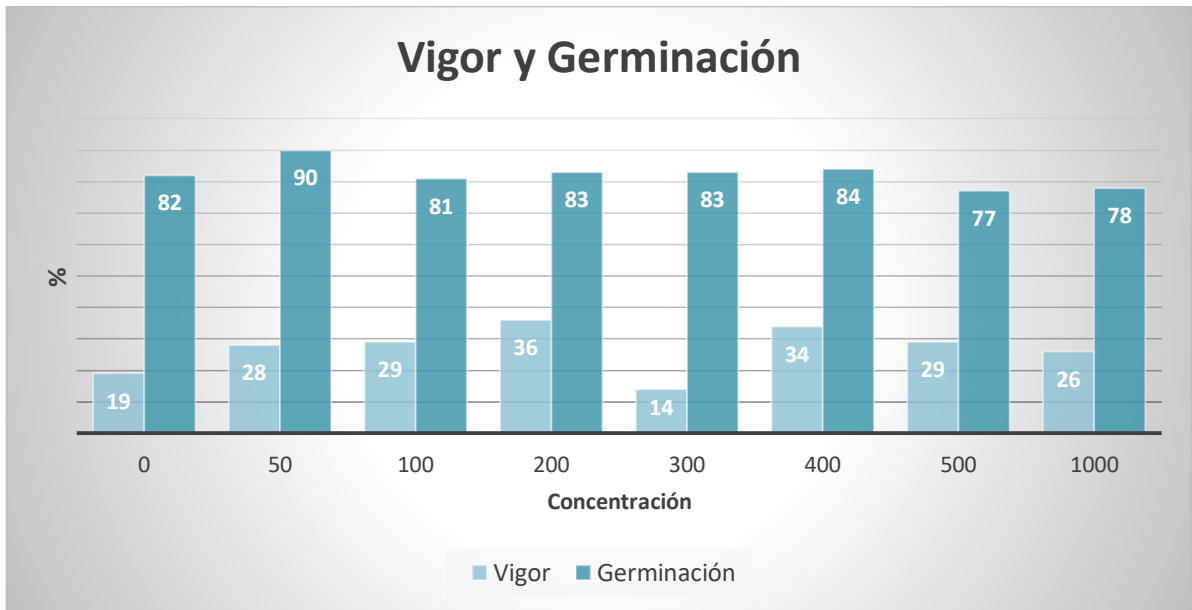
- Ghavam, M. 2018. Efecto de las nanopartículas de plata sobre la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas en *Thymus vulgaris* L. y *Thymus daenensis* Celak bajo estrés salino. *Revista de ciencia de pastizales*, 8 (1), 93-100.
- Ghodake, G., Seo, Y.D., Park, D., Lee, DS. 2010. Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *Brassica juncea* and *Phaseolus mungo*. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* 5(2):157–160. DOI: <https://doi.org/10.1166/jno.2010.1084>.
- González, G., F. M. Mendoza, J. Covarrubias, N. Morán, y J.A. Acosta. 2008. Rendimiento y calidad de semilla de frijol en dos épocas de siembra en la región del bajío. *Agricultura Técnica en México*. 34(4):421-430.
- Hampton, J.G. 2002. What is Seed Quality. *Seed Sci. and Technol.* 30: 1-10.
- Hernández Martínez, Y. 2012. Calidad fisiológica en semillas de maíces comerciales para forrajes. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México.pp.12
- Hulla, J., Sahu, S., y Hayes, A. 2015. Nanotechnology history and future. *Human and Experimental Toxicology*, 34(12), 1318-1321.
- International Seed Testing Association (ISTA). 2004. *International Rules for Seed Testing*. Zurich, Switzerland. 243 p.
- Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F. and Biris, A. S. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*, 3:(10), 3221–3227. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>.
- Khodakovskaya, M., Kim, B., Kim, J., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., and Cernigla, C. 2013. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115-123.
- Khodakovskaya, M.V., De Silva, K., Biris, A.S., Dervishi, E., Villagarcia, H. 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS nano*. 2012;6(3):2128-35.

- Kulkarni, M., Mazare, A., Gongadze, E., Perutkova, Š., Kralj-Iglič, V., Milošev, I., Schmuki, P., and Mozetič, M. 2015. Titanium nanostructures for biomedical applications. *Nanotechnology*, 26(6), 1-19.
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M., and Saleem, M. 2016. Synthesis and characterization of zeolite-based nano– composite: An environment friendly slow-release fertilizer. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 174-183.
- Lira Saldívar, R. H., Méndez Argüello, B., De Los Santos Villarreal, G., y Vera Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Lira-Saldívar, R. H., y Méndez-Argüello, B. 2018. Nanotecnología: Un nuevo paradigma científico en la producción agropecuaria del siglo XXI. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5(13), 1-2. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1500>
- Lira-Saldivar, R.H., A. Hernández-López, L.A. Valdez-Aguilar, L. Ibarra-Jiménez, A. Cárdenas-Flores, and M. Hernández-Suárez. (2014). *Azospirillum brasilense* and *Glomus intraradices* co-inoculation stimulate growth and yield of cherry tomato under shade house conditions. *Phyton Int. J. Exp. Botany*. 83: 133-138
- López-Vargas, E. R., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., and Juárez-Maldonado, A. 2021. El tratamiento de semillas con nanomateriales de carbono impacta en el crecimiento y absorción de nutrientes en tomate bajo estrés salino. *Revista Bio Ciencias*. pp. 8, 21.
- Ma, Y. L. Kuang, X. He, W. Bai, Y. Ding, Z. Zhang, Y. Zhao, Z. Chai. 2010. Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants. *Chemosphere*. 2010; 78(3):273-9.
- Morales-Santos, M.E., Peña-Valdivia, C.B., García-Esteva, A., Aguilar-Benítez, G. y Kohashi-Shibata, J. 2017. Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. *Agrociencia*. 51: 43–62.
- Mushtaq, Y. K. 2011. Effect of nanoscale Fe₃O₄, TiO₂ and carbon particles on cucumber seed germination. Vol. 46, 1732-1735. doi: 10.1080/10934529.2011.633403.

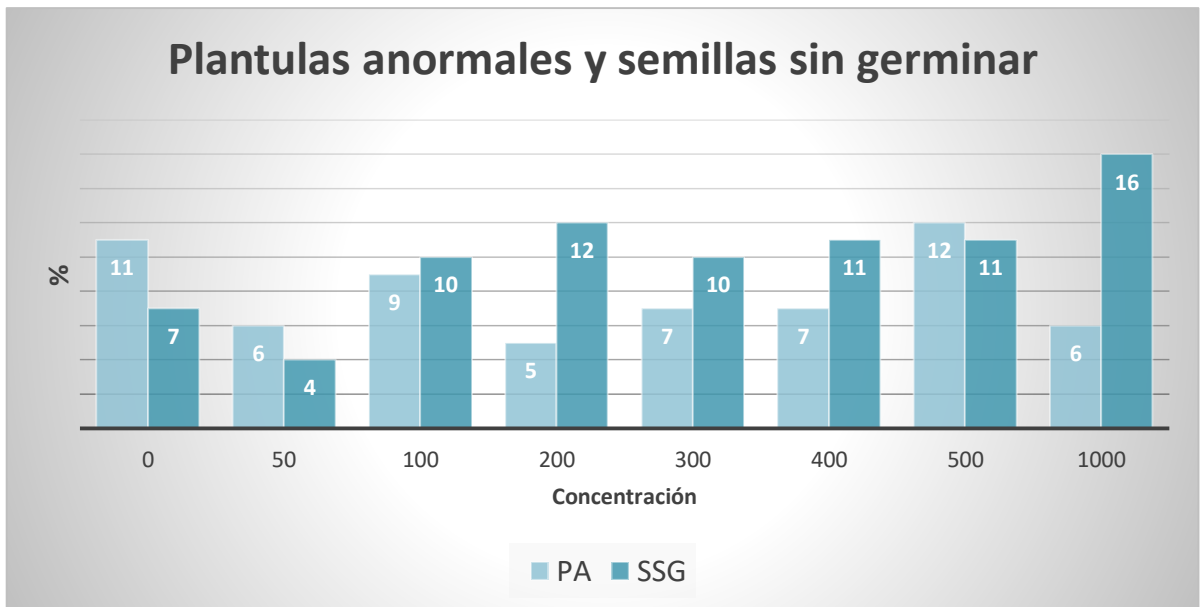
- Prasad, R., V. Kumar, and K.S. Prasad. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.
- Ratnikova, T. A., Podila, R., Rao, A. M. and Taylor, A.G. 2015. Tomato seed coat permeability to selected carbon nanomaterials and enhancement of germination and seedling growth. *The Scientific World Journal*, 2015, 419215. <https://doi.org/10.1155/2015/419215>
- Razzaq, A., R. Ammara, H.M. Jhanzab, T. Mhamood, A. Hafeez, and S. Hussain. 2016. A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *Journal of Nanoscience and Technology* 2(1):55–58.
- Resham, S., M. Khalid, and A.G. Kazi. 2015. Nanobiotechnology in Agricultural Development. In *Plantomics: The Omics of Plant Science*. 683-698.
- Rodríguez Fernández, O. 2016. Desarrollo de la investigación sobre nanotecnología en el centro de investigación en química aplicada (CIQA-CONACYT). En R.H. Lira Saldívar, and B. Méndez Argüello, *Agronano Tecnología Nueva Frontera de la Revolución Verde*. pp. 7-23.
- Rodríguez, J., Castro, D., and Bye, R. 2010. Protocolo de germinación de dos especies de quelites: *Crotalaria pumila* “Chepil” y *Porophyllum ruderale* var. *macrocephalum* “Pápalo.” *Universidad Nacional Autónoma de México*, 7–8.
- Ruiz Torres, N. A., L. I. Cruz Ruiz, R. H. Lira Saldívar, J. I. García López, e I. Vera Reyes. 2017. Respuesta a la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y hierro, en el proceso germinativo de semilla de calabaza (*Cucurbita pepo*). In: *International Symposium on Agrobio Nanotechnology*. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 306.
- Ruiz Torres, N.A., J.I. García López, R.H. Lira Saldívar, I. Vera Reyes, y B. Méndez Argüello. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. In R. H. Lira Saldívar, and B. Méndez Argüello, *Agronano Tecnología Nueva frontera de la Revolución Verde*. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 42-60.
- Saeid, S. and H. Hojjat. 2016. Effects of silver nanoparticle exposure on germination of Lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5(3):248-252.

- Savithamma, N., S. Ankanna, and G. Bhumi. 2012. Effect of nanoparticles on seed germination and seedling growth of *Boswellia ovalifoliolata* and endemic and endangered medicinal tree taxon. *Nano vision* 2:61-68.
- Serag, M., Kaji, N., Gaillard, C., Okamoto, Y., Terasaka, K., Jabasini, M., Manabu, T., Mizukami, H., Bianco, A., and Baba, Y. 2011. Trafficking and subcellular localization of multiwalled carbon nanotubes in plant cells. *ACS nano*, 5(1), 493-499.
- Siddiqui, H. M., Al-Whaibi, H., M. y Mohammad, F. (*Editors*). 2015. *Nanotechnology and Plant Sciences. Nanoparticles and their Impact on plants*. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-14502-0 (eBook). 305 pp.

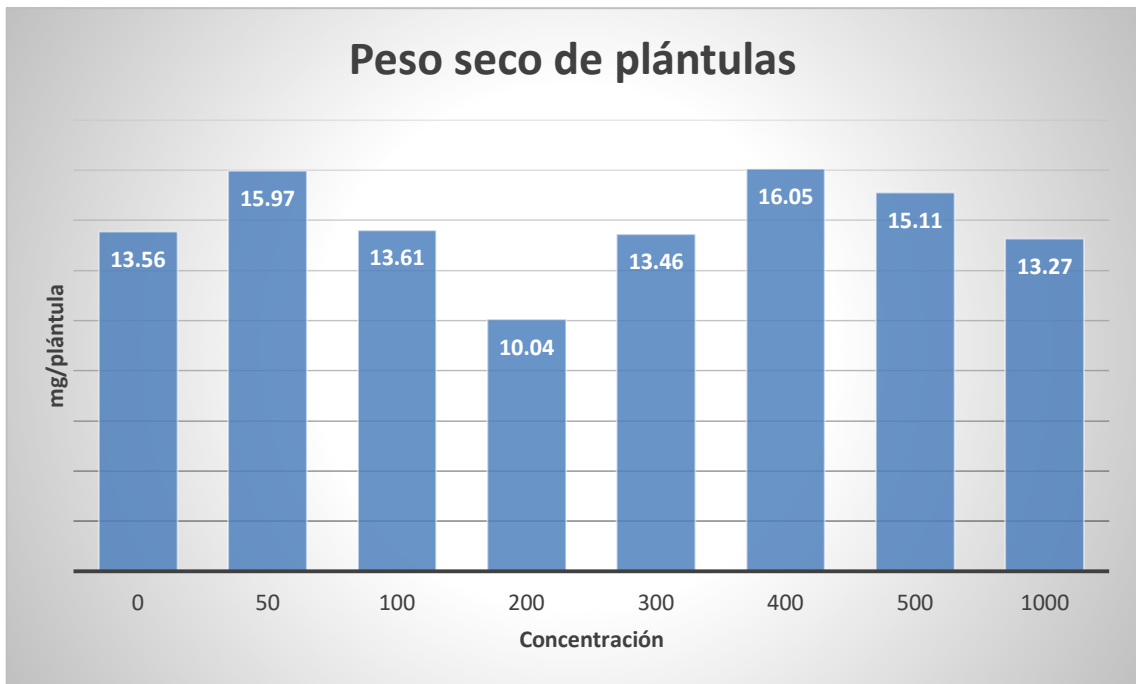
IX. ANEXOS



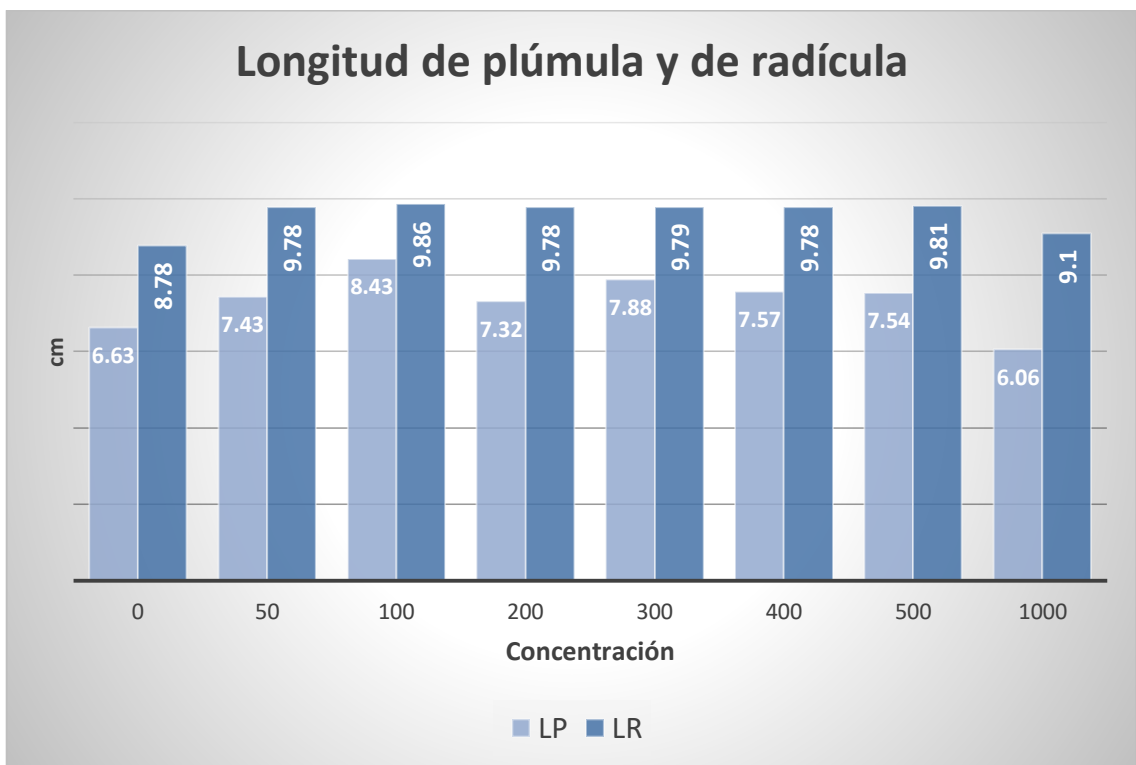
Anexo1: Porcentaje de vigor de germinación y germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC a diferentes concentraciones.



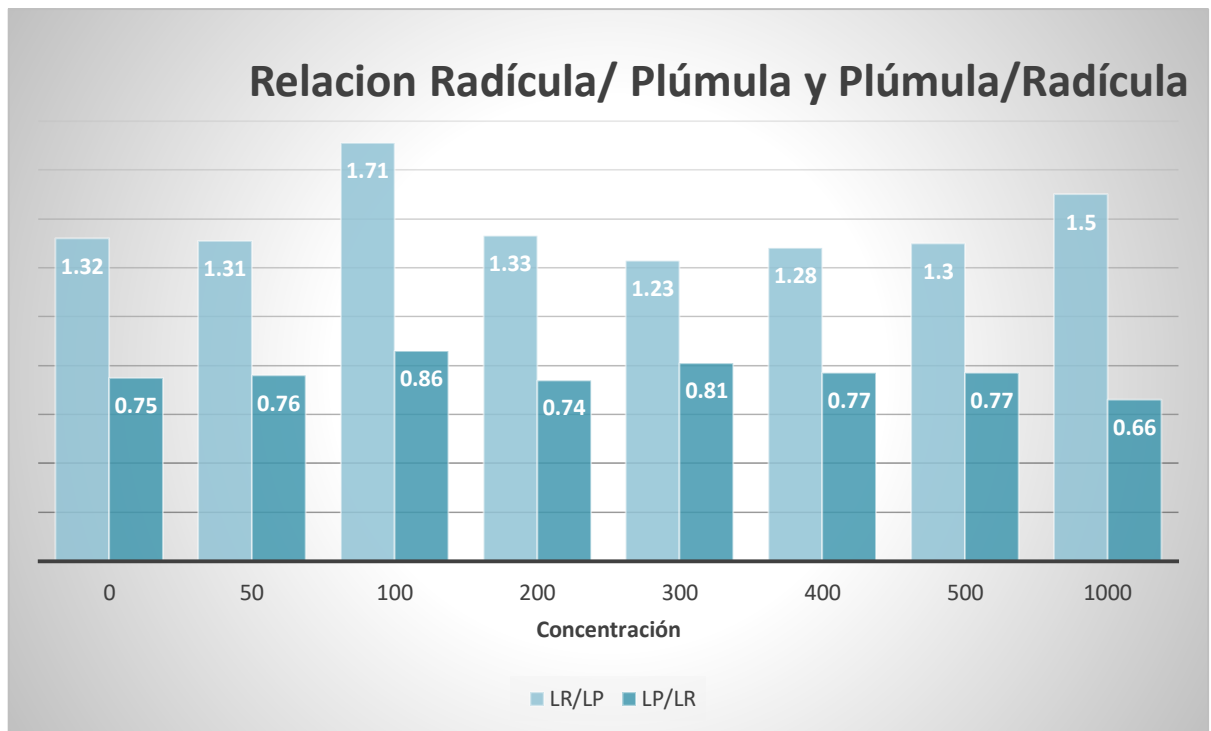
Anexo 2: Porcentaje de plántulas anormales y de semillas sin germinar, obtenidas de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC a diferentes concentraciones.



Anexo 3: Peso seco de plántulas normales obtenidas de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC a diferentes concentraciones.



Anexo 4: Longitudes de plúmula y de radícula de plántulas obtenidas de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC a diferentes concentraciones.



Anexo 5: Relación Radícula/Plúmula y Plúmula/Radícula de plántulas obtenidas de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NTC a diferentes concentraciones.