

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Comparación del Efecto de Nanopartículas Comerciales y Sintetizadas de

Óxido de Zinc sobre Parámetros de Calidad Fisiológica en

Semillas de Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

**ROSA MARÍA CHÁVEZ MENDOZA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Comparación del Efecto de Nanopartículas Comerciales y Sintetizadas de  
Óxido de Zinc sobre Parámetros de Calidad Fisiológica en  
Semillas de Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

**ROSA MARÍA CHÁVEZ MENDOZA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Aprobada por el Comité de Asesoría



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

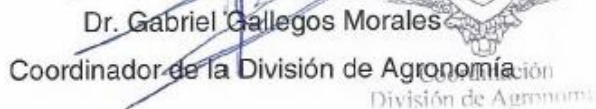
Asesor Principal



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar  
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales  
Coasesor



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

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS**

Por la gracia de mi vida, por la maravillosa oportunidad de concluir mi carrera profesional que, durante años fue uno de los sueños más anhelados, por darme fuerza para resistir las difíciles pruebas y por mantenerme cerca de mi familia aún a pasar de la distancia puesta de por medio para alcanzar este logro.

### **A MIS PADRES:**

**Marcos Chávez Villegas y Andrea Mendoza García**

Por su amor incondicional y su incansable apoyo durante todas las fases de este importante logro, por alentarme a luchar por mis sueños, por estar ahí siempre que más los necesité, por recordarme a cada momento que en la vida lo que más cuesta es lo que realmente vale la pena y que cuando más oscuro se muestra el panorama es porque ya está a punto de amanecer. Gracias por darme la vida, por estar conmigo y ser para mí, sin lugar a duda los mejores padres del mundo, el motor que me impulsa a progresar, la base sobre la cual pude levantarme siempre de cada caída, gracias por ser mi sostén, mi pilar y el mejor regalo que Dios me pudo brindar.

### **A MIS HERMANOS: Gracy, Marquitos, Aby, Carlitos y Mely**

Por ser ustedes la mayor fuente de inspiración, porque en ustedes encontré siempre la fuerza necesaria para seguir adelante en cada reto que parecía que no iba a poder superar. Gracias por ser parte de mi vida.

### **A Juan Herrera Aguilar**

Por ser tú una de las partes esenciales para conseguir este sueño, por motivarme a seguir adelante todas las veces que me quise rendir, por tus palabras de aliento y por haber estado conmigo a cada instante, por todos los bellos momentos que compartimos juntos durante esta travesía, por tu amor y todas las alegrías que has traído a mi vida.

Con profundo agradecimiento a mi **ALMA MATER Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por abrirme las puertas y acogerme cálidamente durante estos años, por darme la oportunidad y la dicha de formarme profesionalmente.

Al **Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)** por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto y por todas las facilidades otorgadas durante su ejecución.

A la **Dra. Norma Angélica Ruiz Torres** por darme la oportunidad y la confianza de realizar esta tesis, por su amistad y sus consejos, y por el tiempo que me dedicó para conseguir llevar este proyecto hasta el final.

Al **Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar** por su apoyo incondicional y su valiosa asesoría, porque con sus consejos supo guiarme y alentarme a ir en busca de seguir creciendo como persona y preparándome para mejorar y afrontar los retos venideros. Gracias por sus valiosas aportaciones para la elaboración de esta tesis.

Al **Dr. Gabriel Gallegos Morales** por la dedicación y atención que de manera amable supo brindarme como coasesor, porque sus recomendaciones me ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al **Mc. Josué Israel García López** por su colaboración y contribución en el desarrollo de esta investigación, gracias por sus generosas aportaciones para mejorar este trabajo.

A la familia **Herrera Aguilar** por abrirme las puertas de su hogar y por apoyarme siempre, en especial a la señora **Consuelo Aguilar** por su cariño y aprecio, y al señor **Ángel Herrera (†)** que, aunque ya no está físicamente con nosotros vivirá para siempre en nuestros corazones.

Al **Ing. Diego Felipe Cárdenas Patiño** porque es una de las personas que más ha dejado huella en mi vida y porque es gracias a él que conocí a la que durante todo este tiempo fue mi casa de estudios, gracias por su ayuda incondicional y por motivarme a ir en busca mis sueños.

Al **Dr. Humberto de León Castillo** por ser parte fundamental de mi formación académica, por creer en mí y exhortarme a hacerle frente a las difíciles circunstancias que se fueron presentando en el camino con valor y confianza en mí misma, gracias por sus sabios consejos y por todo el aprecio que siempre supo manifestar.

Al **Mc. Arnoldo Oyervides García** por sus enseñanzas y por exhortarme siempre a ir en busca de desempeñar mi profesión con orgullo y amor.

A mi tutora la maestra **Martha Elena Ochoa Balderas** por su gran amabilidad, por estar siempre pendiente de mis inquietudes y necesidades durante mi carrera.

A **doña Rosa (†), Janeth y Everardo Reyes** por abrirme las puertas de su hogar al inicio de este anhelo, por su amistad y el apoyo manifestado en todo momento.

A mis compañeros de la **Generación CXXIV (2013-2017)**, por permitirme aprender de ustedes, por todas las muestras de apoyo y compañerismo, y por los lindos momentos que compartimos juntos a lo largo de estos cuatro años, por la voluntad de mantenernos siempre unidos a pesar de las diferencias y por ser verdaderos compañeros en el camino.

A mis amigos **Araceli Alva, Yazmín Cabrera, Citlalli Matus, Luis Hernández, Roberto Hernández, Héctor Hernández, Rodrigo Grimaldo, José Luis Barrientos, Miguel Tafolla, Jorge Espinoza, David Hernández, Carmen de Loera, Alondra Sánchez y Luz Ramírez**, por compartir conmigo durante nuestra carrera tristezas, alegrías, triunfos y sueños, por cada sonrisa, cada palabra de aliento, por ser ustedes parte de una segunda familia que se formó en este sitio, por esa gran amistad que siempre supieron brindarme y por la cual los voy a llevar para siempre tatuados en el corazón.

**A mis profesores:** porque con sus conocimientos contribuyeron a mi formación personal y académica, porque a pesar de que muchas veces fueron ustedes la causa de mis desvelos y del hecho de querer salir huyendo, hoy que concluyo esta etapa de mi vida comprendo que sin sus exigencias y sus valiosos consejos no habría conseguido llegar al final del camino.

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por ser mi guía en todo momento, por cuidarme, acompañarme y ser luz en mi camino.

### **A MIS PADRES**

Con cariño y amor por ser ustedes lo que yo más amo en este mundo, porque son mi mayor motivo para sonreír y salir adelante siempre y porque nunca me voy a cansar de agradecerles por todo lo que me han dado en la vida.

### **Andrea Mendoza García**

A ti mami por creer en mí y ser el ángel más grande que Dios me puso en el camino, por ser mi mejor amiga, mi guerrera incansable, mi modelo a seguir, mi valiente y fiel compañera en todas mis desventuras y mis aciertos, porque siempre has estado ahí para mí con los brazos abiertos. Te dedico este logro que es también tuyo porque siempre me has acompañado en todo el camino, porque en ti encuentro la fuerza para levantarme ante mis tropiezos y porque eres la persona que yo más admiro en el mundo, infinitas gracias por tu entrega total e incondicional.

### **Marcos Chávez Villegas**

A ti papi te dedico este logro porque siempre estuviste dispuesto a apoyarme, en todos mis anhelos, por respetar siempre mis decisiones y luchar conmigo para conseguir este sueño, por sentirte siempre orgulloso de mí y ser el héroe de mi vida, por tu confianza y entrega para sacarnos a mí y a mis hermanos siempre adelante, este logro también es tuyo porque sin ti no habría llegado tan lejos, eres mi orgullo y mi ejemplo a seguir hoy y siempre.

## **A MIS HERMANOS:**

### **Graciela, Marcos, Abigail, Juan Carlos y Melissa**

Porque son los mejores hermanos, los que siempre quise tener, porque son parte esencial de mi vida y porque ha sido una dicha enorme compartir mi infancia a su lado. Gracias por estar conmigo siempre.

### **A Mary Chávez Mendoza (†)**

A ti hermanita porque eres el ángel que desde el cielo nos cuida y porque a pesar de que partiste muy pronto eternamente estarás presente en mi vida.

### **A Juan Herrera Aguilar**

Con amor por darme la oportunidad de compartir este sueño contigo, por todos los momentos maravillosos que he vivido a tu lado, por secar mis lágrimas y esmerarte siempre en cambiar mis tristezas por alegrías, porque el amor que nos une es infinito y uno de los mejores regalos que Dios me ha podido dar. Gracias por tu apoyo incondicional.

### **A mis amigos:**

#### **Araceli, Yazmín, Citlalli, Luis, Roberto, Héctor y Rodrigo.**

Por su apoyo y amistad durante mis estudios profesionales, por ser más que mis mejores amigos y compartir conmigo momentos inolvidables.

A mis familiares y a todos aquellos que creyeron en mí, a quienes a pesar de la distancia siempre supieron ser fieles amigos en las alegrías y en las penas, a todos los que formaron parte de parte de este sueño. Mi eterno agradecimiento por ayudarme a convertirme en la persona que ahora soy y por el apoyo manifestado para alcanzar de manera exitosa esta meta.

## TABLA DE CONTENIDO

ÌNDICE DE CUADROS .....	iii
ÌNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÌNDICE DE ANEXOS .....	v
RESUMEN .....	6
I. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Objetivo general.....	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
1.3 Hipótesis.....	10
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	11
2.1 Origen de la nanotecnología .....	11
2.2 Escala nanométrica .....	12
2.3 La nanotecnología y su importancia.....	12
2.4 Definición de nanopartículas.....	14
2.5 Síntesis de nanopartículas.....	15
2.6 Métodos de síntesis .....	15
2.6.1 Métodos físicos.....	15
2.6.2 Métodos químicos.....	16
2.7 Propiedades y tipos de nanopartículas .....	17
2.7.1 Nanopartículas semiconductoras .....	17
2.7.2 Nanopartículas magnéticas.....	17
2.7.3 Nanopartículas metálicas.....	17
2.8 Síntesis de nanopartículas metálicas.....	18
2.9 Nanopartículas de óxido de zinc .....	18
2.10 Aplicaciones nanotecnológicas en la agricultura .....	19
2.11 Aplicación de nanopartículas metálicas en plantas .....	20
2.11.1 Germinación .....	20
2.11.2 Aplicaciones foliares .....	21
2.11.3 Nanofertilizantes .....	21
2.11.4 Plaguicidas nanométricos .....	22
2.11.5 Inhibición microbiana .....	22
2.12 Vías de absorción y movimiento de las nanopartículas en las plantas .....	23



III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
3.1 Localización del sitio experimental.....	24
3.2 Material biológico.....	24
3.3 Diseño experimental .....	24
3.4 Tipo de nanopartícula .....	25
3.5 Establecimiento del Bioensayo .....	26
3.5.1 Germinación de semillas.....	26
3.6 Evaluación del bioensayo .....	27
3.6.1 Variables evaluadas.....	27
3.6.2 Metodología para la evaluación de las variables.....	27
a) Vigor de germinación.....	27
b) Por ciento de germinación .....	28
c) Por ciento de plántulas anormales .....	28
d) Por ciento de semillas sin germinar .....	28
e) Longitud media de plúmula.....	28
f) Longitud media de radícula.....	29
g) Peso de materia seca .....	29
3.7 Análisis del bioensayo .....	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
V. CONCLUSIONES .....	39
VI. LITERATURA CITADA.....	41
VII. ANEXOS.....	47

## ÌNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays L.</i> ), tratadas con NPsZnO. .....	31
Cuadro 2. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays L.</i> ), tratadas con NPsZnO, por concentración.....	33
Cuadro 3. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays L.</i> ), por tratamiento.....	37

## ÌNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Principales aplicaciones de la nanotecnología (Ávalos et al., 2013). .....	12
Figura 1. 2 Comparación del tamaño de una nanopartícula respecto a la dimensión de algunos materiales y seres vivos en escala nanométrica (Passaretti et al., 2017).....	14
Figura 1. 3 Métodos de síntesis de nanopartículas metálicas (Gómez, 2011).....	16
Figura 1. 4 Estructura cristalina típica de ZnO donde las esferas oscuras representan al zinc y las claras al oxígeno (Pérez et al., 2008). .....	19

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Porcentaje de vigor de germinación por tipo de NPsZnO y por concentración. .....	47
Anexo 2. Peso seco (mg/plántula) por tipo de NPsZnO y por concentración.....	47
Anexo 3. Longitud de plúmula (cm) por tipo de NPsZnO y por concentración.....	48
Anexo 4. Longitud de radícula (cm) por tipo de NPsZnO y por concentración.....	48
Anexo 5. Porcentaje de vigor de germinación por tipo de NPsZnO. ....	49
Anexo 6. Peso seco (mg/plántula) por tipo de NPsZnO.....	49
Anexo 7. Longitud de plúmula y de radícula (cm) por tipo de NPsZnO.....	50

## RESUMEN

Comparación del Efecto de Nanopartículas de Óxido de Zinc Comerciales y de Ingeniería sobre Parámetros de Calidad Fisiológica en Semillas de maíz (*Zea mays L.*)

El presente trabajo fue desarrollado 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), con el objetivo de evaluar mediante un bioensayo el efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) de tipo comercial y de ingeniería de forma redonda, sobre parámetros de calidad fisiológica en semillas de maíz *var.* Jaguan, para determinar si promueven o inhiben el vigor de germinación y crecimiento de plántulas.

El bioensayo constó de tratamientos con dos tipos de NPs (NPsZnO comerciales y NPsZnO de ingeniería tipo redonda), a seis concentraciones diferentes (0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm), cada tratamiento constó de 150 semillas fraccionados en seis repeticiones de 25 semillas cada una.

Las semillas fueron colocadas en cajas Petri para ser asperjadas con las diferentes concentraciones de cada tipo de nanopartícula, utilizando agua destilada como vehículo de aplicación. En cada caja se añadieron 20 ml de solución, mientras que el testigo (0 ppm) consistió únicamente en agua destilada para inducir el proceso de germinación de las semillas, las cuales fueron sometidas a un proceso de imbibición por 24 horas.

Después del tratamiento con las NPs, las semillas fueron sembradas utilizando el método de germinación entre papel, colocando las semillas entre dos hojas de papel Anchor, humedecidas con agua destilada y dobladas a manera de "taco", los cuales se introdujeron en bolsas de plástico y se colocaron en una cámara de germinación a una temperatura de 25°C, fotoperíodo de 16 horas luz y 8 de oscuridad a una humedad relativa de 75%. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 6; dos tipos de nanopartícula y 6 concentraciones.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar las diferencias estadísticas entre tratamientos y concentraciones, posteriormente se efectuó una comparación de medias utilizando la Prueba de Tukey a fin de establecer el orden de eficiencia de los tratamientos, utilizando el programa SAS Inc. (2009).

Los resultados obtenidos en este estudio indican que las plántulas mostraron una mejor respuesta para la expresión del vigor de germinación, peso seco de plántula y longitud media de plúmula y de radícula, al aplicar 0.5 ppm, lo cual indica que, a bajas dosis se promueve un incremento notorio de estas variables, como resultado del estímulo que las NPs generan durante los procesos de imbibición y de germinación.

Se observó que la aplicación de las NPsZnO estimula la promoción del crecimiento y el desarrollo, al evidenciar un mayor tamaño de plántulas y un incremento en el peso seco de las mismas y, al efectuar la comparación de medias entre tipos de nanopartícula se encontró que las NPsZnO de ingeniería (redondas) manifestaron una mejor respuesta en las variables vigor de germinación y peso seco de plántula, sin embargo, en el caso de la longitud media de plúmula y de radícula, las NPsZnO comerciales mostraron un mayor incremento en los valores obtenidos para las diferentes concentraciones empleadas.

En este estudio se deja ver la posibilidad de generar un incremento en la respuesta fisiológica de los diversos cultivos, a través de la evaluación de variables asociadas con el crecimiento durante el proceso de germinación, asumiendo que la concentración óptima depende del tipo de NPs que se esté empleando y de la especie en estudio.

**Palabras clave:** nanopartículas, óxido de zinc, vigor, germinación, peso seco, plúmula y radícula.

## I. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes en México, no sólo por ser Centro de Origen y Diversidad, sino porque tiene una estrecha relación con la vida, las tradiciones y costumbres del pueblo mexicano, sobre todo en las zonas rurales donde la amplia diversidad de variedades ha ido evolucionando a través de la historia, por medio de la domesticación (O' Leary, 2016).

A través de los años, el maíz ha sido objeto de diversos estudios a nivel genético, molecular y agronómico, para mejorar su potencial productivo, mediante el empleo de herramientas tecnológicas como la ingeniería genética y los métodos de mejoramiento convencionales. Lo anterior es derivado de su esencialidad como cultivo básico en la alimentación, debido a que se considera como el cultivo más producido a nivel mundial y el cereal más importante en varios sectores de la economía (Serratos, 2009).

Actualmente, el incremento en la demanda de la producción de éste y otros insumos alimenticios, cada vez más inocuos y de mejor calidad, aunado a la falta de disponibilidad de recursos físicos y económicos, que permitan elevar de manera tradicional la productividad en los cultivos, nos orientan a buscar nuevas alternativas de producción que permitan llevar a cabo dicha labor.

En este contexto, existen herramientas del ramo de la ciencia y la tecnología, que han adquirido un gran auge en los últimos tiempos, debido al impacto generado en trabajos experimentales de investigación científica, entre ellas destacan las nanociencias (NCs) y la nanotecnología (NT) (Mendoza y Rodríguez, 2007).

La NT es una ciencia aplicada de manera innovadora a muchos campos de investigación e implica el uso de materiales a un nivel considerablemente pequeño, a millonésimas partes de un milímetro, confiriendo a los materiales, a dicha escala, propiedades diferentes que pueden acarrear consigo una serie de beneficios potenciales y revolucionarios en comparación con objetos de mayor escala (Windebank and Ward, 2004).

De manera reciente se ha considerado a la NT como una herramienta de la ciencia moderna innovadora (Sánchez *et al.*, 2009), que puede contribuir al logro de retos importantes como el desarrollo estrategias encaminadas al abastecimiento de la demanda alimentaria, proyectando que su aplicación en la producción agrícola puede propiciar un incremento factible en el rendimiento de los cultivos.

En relación a lo mencionado, se considera necesario generar y enriquecer, a través de la investigación, la información acerca del efecto que las NPs promueven en los cultivos, ya que se ha descubierto que poseen potencial para la mejora de la producción en el sector agrícola, al propiciar efectos positivos durante las fases del ciclo fenológico de los mismos.

En virtud de lo anterior, en el presente trabajo se evaluó la aplicación de diferentes concentraciones de NPs de óxido de zinc (NPsZnO), de tipo comercial y de ingeniería, en semillas de maíz *var.* Jaguan, para valorar el efecto a través de la determinación de parámetros de calidad fisiológica durante la germinación, como el vigor de germinación, la longitud media de plúmula y de radícula y el peso de materia seca, a fin de determinar si este tipo de materiales nanoestructurados, funcionan como promotores de crecimiento y desarrollo durante las primeras etapas fenológicas del cultivo.



## **1.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), de tipo comercial y de ingeniería, a diferentes concentraciones sobre el proceso de germinación en semillas de maíz *var. Jaguan* y su respuesta en parámetros de calidad fisiológica.

## **1.2 Objetivos específicos**

1.\_ Determinar a qué concentración las NPsZnO actúan como un agente promotor de la germinación en semillas de maíz.

2.\_ Demostrar cuál tipo de nanopartícula (comercial o de ingeniería), presenta un efecto superior como promotor del vigor, y por lo tanto del crecimiento y desarrollo de plántulas.

## **1.3 Hipótesis**

1.\_ La aplicación de NPsZnO promueve una respuesta en el vigor y la germinación de las semillas, en comparación con el testigo.

2.\_ Los efectos en cuanto al vigor de germinación, longitud de plúmula, de radícula y peso de materia seca, en plántulas de maíz obtenidas de semillas tratadas con nanopartículas de ingeniería tipo redonda, serán mejores en comparación con las comerciales.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Origen de la nanotecnología

La nanotecnología (NT) es un término que deriva del griego *nanno*, cuyo significado es enano y permite un manejo de la naturaleza a escala molecular, atómica y sub atómica. El término fue acuñado por el japonés *Tanaguchi Norio* en el año de 1974, pero fue el norteamericano *Richard Feynman* (Premio Nobel de Física en 1965), quien le adjudicó, en el año de 1959, la propiedad de estudiar las cosas átomo por átomo en la conferencia “There’s Plenty of Room in the Bottom”, durante una reunión de la Sociedad Americana de Física realizada en Caltech, EE. UU. (California Institute of Technology), haciéndola ver para la comunidad científica como uno de los proyectos más innovadores y ambiciosos de la ciencia moderna (Mejía *et al.*, 2009).

La NT es una rama interdisciplinaria de la investigación debido a que da lugar a una amplia gama de oportunidades en diversos sectores como la farmacéutica, la medicina, la electrónica, la física, la biología, la ingeniería, la química y la agricultura (Figura 1.1). El potencial uso de la NT y los beneficios que derivan de ella, son importantes para revolucionar la industria textil, el sector salud, las tecnologías de la comunicación y la industria alimentaria, por medio de su aplicación a la agricultura como un enfoque moderno (Prasad *et al.*, 2014).

En otra definición de NT, Mendoza y Rodríguez (2007) hacen referencia a que esta rama de la ciencia consiste en el diseño, caracterización y la aplicación de estructuras y sistemas complejos, a través del arte de controlar, el tamaño, la forma y las propiedades de la materia a una nanométrica escala, motivo por el cual se le ha otorgado dicho término.



**Figura 1. 1** Principales aplicaciones de la nanotecnología (Ávalos *et al.*, 2013).

## 2.2 Escala nanométrica

Un nanómetro es la unidad de longitud que equivale a una millonésima parte de un metro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). En esta escala, las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de los materiales, objetos, sistemas, etc., difieren de manera fundamental de las propiedades de los mismos a tamaño micro/macrocópico, por lo que la investigación y desarrollo de la nanotecnología, se orienta a la comprensión y creación de materiales mejorados, dispositivos y sistemas que exploten estas nuevas propiedades (CIMAV, 2008).

## 2.3 La nanotecnología y su importancia

El inicio de la NT tuvo su punto de partida en los años 80s, cuando el empleo de una diversa gama de microscopios de sonda de barrido permitió la obtención de imágenes a una escala atómica, dando lugar al descubrimiento de los nanotubos de

carbono (NTC) y los biosensores empleados en la mecánica y la electricidad. Hoy en día son miles los productos generados a partir de la nanotecnología, con fines industriales la gran mayoría, aunque las investigaciones de mayor avance en este ámbito derivan del campo de la biología y de la medicina (Mejía *et al.*, 2009).

Di Sia (2017) señala que el papel de la NT ha adquirido cada vez más importancia en nuestra sociedad, ya que ha marcado el comienzo de una nueva era, está modificando el estilo de vida y representa un desafío científico y tecnológico que se conduce al desarrollo sostenible, mediante perspectivas para el desarrollo social y económico, a través de líneas en el campo de la eco-innovación como son: la obtención de nuevos materiales, producto de la investigación, destinados a ser menos peligrosos y reciclables, químicos con mayor durabilidad como los tejidos, los plásticos biodegradables y polímeros nuevos multifuncionales, así como nuevas modalidades de producción y adquisición a través de la economía compartida, basada en una reducción drástica de residuos y la eliminación de la posesión de productos de forma exclusiva .

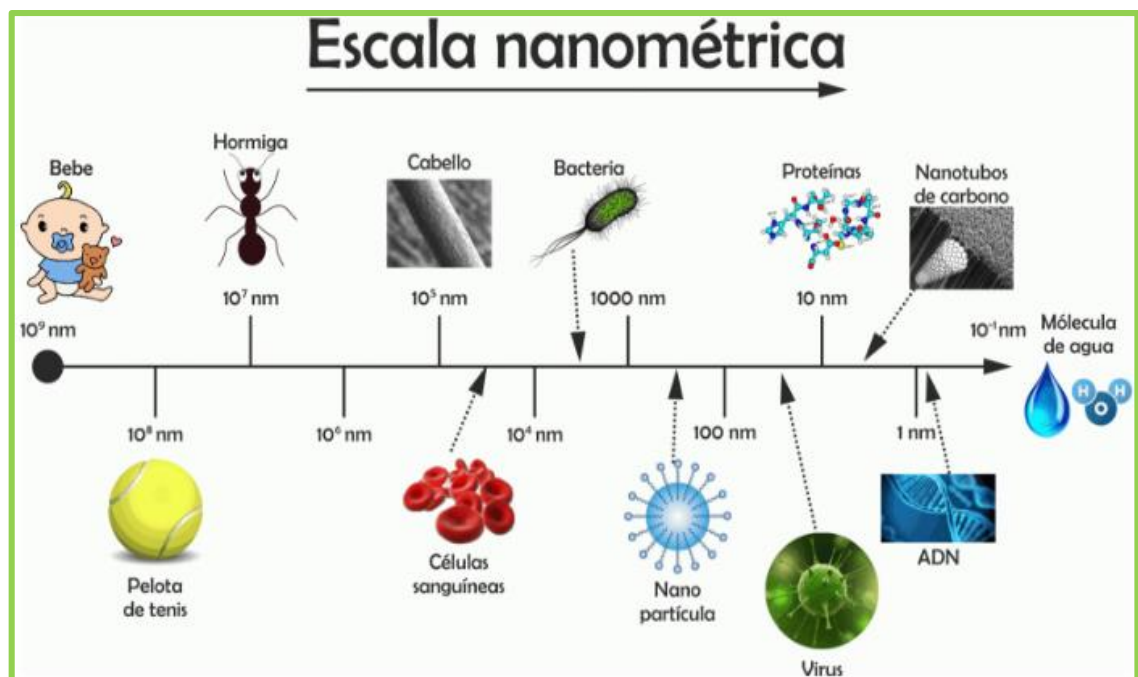
Zagayo y Foladory (2010) indican que la NT promete ser la próxima revolución industrial, ya que la economía mundial se basa cada vez más en el conocimiento y en la innovación tecnológica, por ello, los países que no invierten en educación y conocimiento quedan en desventaja. Dicha razón es la que propicia que, en México la NT resulte más que una opción para el desarrollo y la competitividad, visualizándola como una necesidad y una obligación.

En México existen ya diversos centros académicos que realizan investigación en nanociencia y NT, enfocados en nuevas estructuras, nanopartículas, nanopelículas y polímeros nanoestructurados (Mejía *et al.*, 2009).

Takeuchi y Mora (2011) argumentan que la NT requiere que la comunidad científica y los tecnólogos incluyan a sus miembros y a los miembros de la sociedad, en el estudio de los cambios futuros que vendrán, debido a que se proyecta que es una herramienta que transformará la ciencia y la tecnología, a raíz de su contribución en la resolución de problemáticas como los cambios climáticos, el uso del agua potable, el desarrollo de la agricultura y la creación de formas de vida sustentables.

## 2.4 Definición de nanopartículas

Las NPs son materiales cerámicos, polímeros semiconductores, o una combinación de estos, que poseen un tamaño que oscila entre 1 y 100 nanómetros (Figura 1.2). Dicha característica les otorga la capacidad de pasar a través de las membranas de los organismos y su diversidad es muy extensa, ya que pueden, en teoría ser procesadas casi por cualquier sustancia química (Gutiérrez *et al.*, 2009).



**Figura 1. 2** Comparación del tamaño de una nanopartícula respecto a la dimensión de algunos materiales y seres vivos en escala nanométrica (Passaretti *et al.*, 2017).

## **2.5 Síntesis de nanopartículas**

La manipulación de las condiciones de síntesis de los materiales permite tener un control racional del tamaño y la forma de las partículas, suministrando los medios para adaptar las propiedades de un material a una aplicación específica, sin modificar su funcionalidad y composición. Hasta ahora se han realizado avances significativos en el diseño de estrategias para la síntesis y el ensamblado modular de NPs de alta calidad, a partir de una gran variedad de materiales inorgánicos, los cuales son particularmente atractivos como fuente de diseño y construcción para explotar sus propiedades únicas, en diversas aplicaciones (Zanella, 2012).

## **2.6 Métodos de síntesis**

Los métodos de síntesis de NPs se agrupan principalmente en dos categorías: métodos físicos, aproximación de “arriba hacia abajo” y métodos químicos, aproximación de “abajo hacia arriba” (Rao *et al.*, 2004; Schmid, 2004).

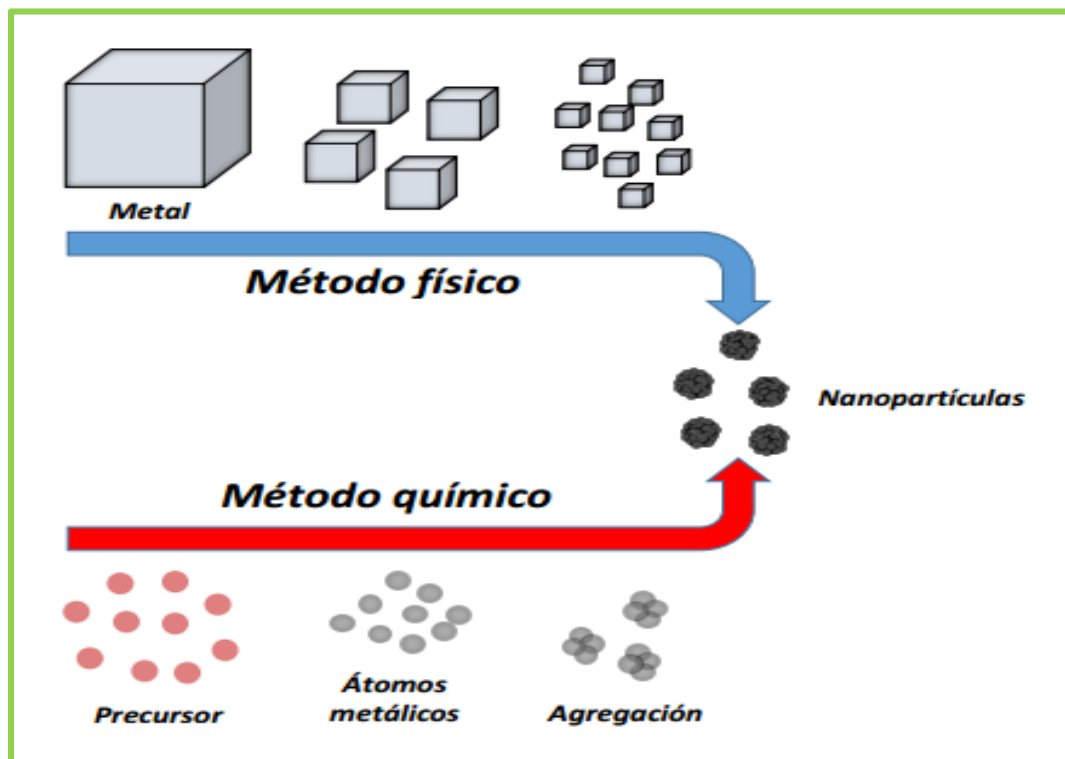
### **2.6.1 Métodos físicos**

Los métodos físicos de síntesis (Figura 1.3) se basan en la división de sólidos másicos en porciones más pequeñas, a través del empleo de procesos como la molienda, el desgaste y la volatilización de un sólido, seguido por la condensación de los componentes volatilizados. Por lo general este tipo de métodos emplean instrumentación complicada y compleja. En esta clasificación los métodos principales que destacan son la nanolitografía, la pulverización catódica, la evaporación térmica, la preparación de clústeres gaseosos, la implantación de iones, el método de plasma y la ablación laser, incluyendo el desgaste y la pirolisis (Nanoquímica, 2012).

## 2.6.2 Métodos químicos

Los métodos químicos (Figura 1.3) consisten en la fabricación de NPs a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en una solución, este último enfoque es el más popular en la síntesis, porque es el más conveniente para la obtención de NPs pequeñas y uniformes.

Este tipo de métodos son preferidos por encima de los métodos físicos debido a que resultan menos costosos y entre ellos destacan el método coloidal, la reducción radioquímica y fotoquímica, la irradiación con microondas, uso de dendímetros, síntesis solvotermal y el método sol-gel (Zanella, 2012).



**Figura 1. 3** Métodos de síntesis de nanopartículas metálicas (Gómez, 2011).

## **2.7 Propiedades y tipos de nanopartículas**

De acuerdo a la naturaleza de un material estructurado y de sus propiedades químicas se puede definir el tipo de NP y la aplicación a la cual se destina dentro de las diversas disciplinas del ámbito de la investigación. De esta manera, se considera que existen NPs de naturaleza metálica, semiconductoras y magnéticas principalmente (Hernández, 2011).

### **2.7.1 Nanopartículas semiconductoras**

Se elaboran haciendo uso de la combinación de un precursor metálico con los elementos que pertenecen a la familia del oxígeno, a partir de una mezcla de los elementos del grupo III con los elementos del grupo IV de la tabla periódica, confiriéndoles propiedades importantes como la fotoluminiscencia, que es capaz de absorber luz en forma de fotones para emitirla posteriormente en una diferente longitud de onda (Quintana *et al.*, 2008).

### **2.7.2 Nanopartículas magnéticas**

Están formadas por un núcleo magnético que suele ser comúnmente magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o maghemita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el cual se recubre con un material biocompatible, a fin de aislar la NP del medio o fluido para evitar que se oxide o se disuelva en el mismo, así como para favorecer la funcionalización de grupos carboxilos o de otras moléculas (Hernando, 2007).

### **2.7.3 Nanopartículas metálicas**

Este tipo de NPs se caracterizan por poseer un determinado número de electrones libres confinados en un pequeño espacio, brindándoles la capacidad de interactuar de manera específica con la luz, la cual se puede observar con claridad en soluciones de



diferentes tamaños de NPs, que presentan colores que van desde el púrpura hasta el marrón, como resultado de la oscilación colectiva de la interacción de los electrones con la luz (Quintana *et al.*, 2008).

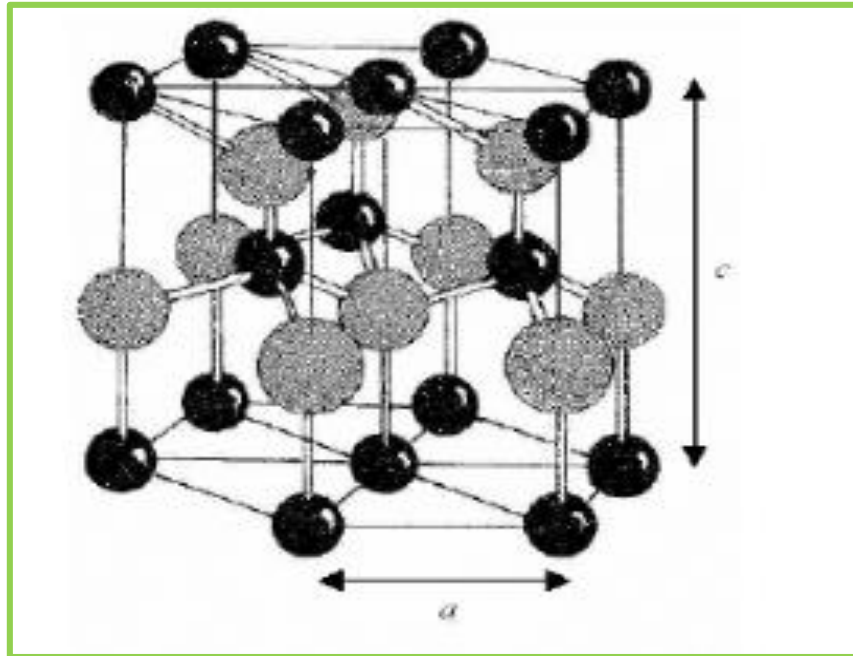
## **2.8 Síntesis de nanopartículas metálicas**

Gómez (2011) menciona que las NPs metálicas pueden obtenerse por un método físico conocido como “top down” el cual consiste en la subdivisión mecánica del metal. También por un método químico denominado “bottom-up” que consiste en la nucleación y el crecimiento de las partículas a partir de átomos metálicos, este último ofrece ventajas en cuanto al tamaño y reproducibilidad.

## **2.9 Nanopartículas de óxido de zinc**

El óxido de zinc es un elemento semiconductor perteneciente a la familia II-IV cuya diferencia de electronegatividad entre el zinc y el oxígeno produce un alto grado de ionicidad en su enlace (Figura 1.4), por ello se considera como uno de los compuestos más iónicos de dicha familia.

Posee un gran interés tecnológico en estructuras de baja dimensionalidad, y se considera en la actualidad, como uno de los materiales más prometedores en numerosos campos de estudio y aplicaciones tecnológicas, a partir del cual se pueden obtener múltiples nanoestructuras en forma de nanohilos, nanofibras y NPs (Vicente, 2009).



**Figura 1. 4** Estructura cristalina típica de ZnO donde las esferas oscuras representan al zinc y las claras al oxígeno (Pérez *et al.*, 2008).

## 2.10 Aplicaciones nanotecnológicas en la agricultura

El desarrollo de nanomateriales y nanodispositivos ha abierto la puerta al desarrollo de nuevas aplicaciones potenciales en la biotecnología y la agricultura, entre ellas destacan los sistemas de liberación inteligente, los nanomateriales y los nanosensores que se catalogan como los dispositivos más prometedores para su aplicación en el ramo de la industria agroalimentaria y la agricultura (Pérez, 2016).

Quintili (2012) menciona que en el ámbito agrícola, la producción está basada en el empleo de diversas tecnologías de producción y que para elevar la producción y reducir costos al máximo, la selección de las mejores semillas obtenidas tecnológicamente y genéticamente han sido los factores esenciales para concretar este logro. Las investigaciones en este ámbito se basan actualmente en el desarrollo de nuevas técnicas que hacen uso de NPs que permiten introducir ADN ajeno a una célula.

El objetivo de los nanomateriales en la agricultura se enfoca en los posibles beneficios que pueden derivarse de su aplicación, y que van desde el avance de la calidad de los alimentos y la seguridad en la reducción de los insumos agrícolas empleados, así como la mejora de la nutrición de los cultivos a través de la nanoformulación de fertilizantes, rompiendo las barreras de la calidad nutricional y el control de plagas y enfermedades con el uso de nanoplaguicidas, a fin de incrementar la productividad, considerando a la par un uso de agua y nutrientes de forma eficiente (Mukherjee *et al.*, 2015).

En la agricultura ya se han llevado a cabo numerosos estudios en los que se desarrollan herramientas para la mejora de la capacidad de absorción de nutrientes en el suelo, la resistencia a factores ambientales desfavorables y a organismos como plagas y enfermedades para aumentar de forma considerable las cosechas en pro de la obtención de alimentos más saludables y nutritivos pero el desafío continua aún en espera de nuevas aportaciones importantes para la mejora de la calidad de vida de la humanidad (Lamas, 2010).

## **2.11 Aplicación de nanopartículas metálicas en plantas**

### **2.11.1 Germinación**

Arias *et al.* (2015) reportan que al aplicar 2.5 ml de una solución de NPsZnO a 200 ppm en semillas de girasol, el porcentaje de germinación adquirido fue de 94.44 %, en comparación con el porcentaje obtenido en semillas tratadas con una solución a 1600 ppm que fue de 74.44 %, en base a los resultados, se considera que a altas concentraciones el efecto en el crecimiento resultante es negativo y que afecta considerablemente la germinación de la semilla.

Liu *et al.* (2016) al evaluar los efectos de los óxidos de Cu, Zn, Mn y Fe a concentraciones bajas (<50 ppm), en la germinación de semillas de lechuga en un medio acuoso, encontraron que la toxicidad a dicha concentración es escasa y que las NPs de MnO y FeO, estimulan significativamente el crecimiento de la lechuga en un rango de 12-54 %.

### **2.11.2 Aplicaciones foliares**

En un estudio realizado mediante la aplicación de NPs de zinc sobre hojas de frijol mungo, a los 14 días posteriores a la germinación de sus semillas, se observó que aumentó la actividad de tres enzimas importantes en las plantas: la fosfatasa alcalina, la fosfatasa ácida y la fitasa, las cuales al activarse, produjeron un aumento del 11 % más en la cantidad de fósforo, presente de forma natural en el suelo, sin recibir una fertilización adicional de este elemento; además, la biomasa aumentó en un 27 %, y el 6 % del número total de plantas produjeron más granos que las que fueron tratadas de manera convencional usando prácticas agrícolas típicas y sin uso de fertilizantes (Agrimundo-FAO, 2016).

### **2.11.3 Nanofertilizantes**

Los nanofertilizantes obtenidos a partir de una gran gama de NPs de metales y óxidos metálicos están siendo investigados para uso científico en las plantas y en la agricultura, se les atribuye potencial para aumentar el valor nutricional de las plantas al aplicarse en pequeñas cantidades a través del riego, o por pulverización directamente a las hojas y, debido a su tamaño extremadamente pequeño, pueden ser absorbidas por las plantas de manera más eficiente, permitiendo un mejor aprovechamiento de los nutrientes sin recurrir a la aplicación de elevadas cantidades de fertilizantes al suelo en busca de una óptima nutrición, acción que hoy en día es motivo de preocupación en materia de medio ambiente, debido a la contaminación que se ha presentado en los últimos años (Quintili, 2012).

Desde este punto de vista se encontró en un estudio que la aplicación de NPs de dióxido de titanio y óxido de zinc en plantas de tomate empleadas como nanofertilizantes, generó un aumento en la cantidad de licopeno presente en los tomates (entre un 80% y 113%, dependiendo de la dosis), lo anterior debido a que las NPs aumentan las tasas fotosintéticas de las plantas y les permiten aprovechar mejor los nutrientes disponibles (Brunel, 2015).

#### **2.11.4 Plaguicidas nanométricos**

Actualmente la industria de los plaguicidas está incursionando en la generación y el empleo de ingredientes activos de tamaño nanométrico y muchas de las compañías agroquímicas que se dedican a la formulación están en busca de desarrollar nuevas fórmulas y moléculas a escala nano para la producción y diseño de nuevas formulaciones de plaguicidas que permitan contrarrestar el impacto negativo que las aplicaciones convencionales generan en el medio ambiente (Quintili, 2012).

#### **2.11.5 Inhibición microbiana**

En un estudio para demostrar la actividad de inhibición microbiana del zinc se encontró que, al aplicar concentraciones de NPsZnO mayores a 3 mmol L<sup>-1</sup>, se afecta el crecimiento y desarrollo de *Botrytis cinerea* y *Penicillium expansum*, dos hongos fitopatógenos que causan considerables pérdidas en poscosecha, estos resultados sugieren que las NPsZnO podrían ser utilizadas como un fungicida eficaz en aplicaciones agrícolas y de seguridad alimentaria (He et al., 2011).

## 2.12 Vías de absorción y movimiento de las nanopartículas en las plantas

Las probabilidades de ingreso y translocación de las NPs en las plantas se considera baja, a no ser que el tamaño sea muy pequeño, ya que las paredes celulares de muchas plantas poseen tamaños de poro de 5 nm o menos. Sin embargo se ha demostrado que las NPs de un rango amplio de tamaños entre 10 y 50 nm y con diferente química superficial se encuentran biodisponibles para algunas plantas (Sarabia y Fernández, 2016).

Peng *et al.* (2016) mencionan que las nanopartículas pueden ser translocadas y modificadas in vivo genéticamente y al aplicar 100 mg/L de NPs $\text{CuO}$  a plantas de arroz durante 14 días, encontraron que las nanopartículas se trasladaron a la epidermis de la raíz, a la exodermis, la corteza y finalmente a la endodermis, pero el paso a través de la banda de Caspary se dificultó, sin embargo, las raíces laterales funcionaron como una vía potencial de transporte desde las raíces hasta las hojas.

Por otro lado, Cifuentes *et al.* (2010) utilizaron nanopartículas revestidas de carbono magnético en trigo, girasol, tomate y guisante, cuyos resultados mostraron una fácil absorción de las NPs a través del sistema radicular, dando lugar a la translocación mediante el cilindro vascular donde se transportan a través del flujo de transpiración en los vasos del xilema hacia la parte aérea de las plantas en menos de 24 horas. Este rápido movimiento de las NPs puede tener un impacto positivo para el desarrollo de NPs como sistemas de administración inteligente hacia el interior de la planta. Además, encontraron que la aplicación de raíz es más confiable y rápida que los tratamientos dirigidos a las hojas.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Localización del sitio experimental**

El presente trabajo se realizó 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), la cual se localiza en las coordenadas 25° 21' 13" N, 101° 1' 56" W, en Buenavista, al sur del municipio de Saltillo, Coahuila, México, sobre la calzada Antonio Narro.

#### **3.2 Material biológico**

El material biológico vegetal utilizado en este trabajo es una variedad criolla mejorada de maíz denominada "*Jaguan*", adaptada para ambientes de temporal del Sureste de Coahuila, en áreas de transición entre 1800 a 2200 msnm, la cual se encuentra registrada con el número MAZ-1213-240511 en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), y cuyo poseedor del título de obtentor para su aprovechamiento y explotación es la UAAAN (Rincón *et al.*, 2014).

#### **3.3 Diseño experimental**

El bioensayo se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 6, conformado por dos factores: tipo de NPs (Ingeniería y Comercial) y seis concentraciones (0, 0.5, 1.0, 5.0, 10 y 50 ppm).

### 3.4 Tipo de nanopartícula

Se emplearon dos tipos de NPs elaboradas a base de óxido de zinc, (NPsZnO), la primera de tipo comercial, ya existente en el mercado con un tamaño de 20 nanómetros y la segunda, NPs de ingeniería tipo redonda, con un tamaño de alrededor de 10 nanómetros, sintetizadas y caracterizadas en el Laboratorio de Materiales Avanzados del CIQA.

Los tratamientos constaron de soluciones preparadas con agua destilada, empleada como vehículo de aplicación y NPsZnO de cada tipo, a diferente concentración (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 Tratamientos de NPs aplicados para determinar su efecto en la germinación y vigor de semilla de maíz variedad JAGUAN.

<b>NPs</b>	<b>Concentración (ppm)</b>
<b>Comerciales</b>	0
	0.5
	1
	5
	10
	50
<b>Ingeniería</b>	0
	0.5
	1
	5
	10
	50

NPs=Nanopartículas; ppm= Partes por millón.



## **3.5 Establecimiento del Bioensayo**

### **3.5.1 Germinación de semillas**

Para evaluar el efecto de la aplicación de los materiales nanoestructurados en la germinación de semillas de maíz, se estableció un bioensayo, el cual constó de seis repeticiones de 25 semillas cada una para cada tipo de NPs.

Para la aplicación de las soluciones con NPs se utilizaron doce cajas Petri, las cuales fueron esterilizadas de manera previa, posteriormente se les colocó en el fondo una capa de papel filtro tipo Whatman. En seguida, con ayuda de unas pinzas estériles se distribuyeron 150 semillas de maíz en cada una.

Antes de la aplicación de los tratamientos, cada solución se sometió a un proceso de sonicación durante siete minutos para asegurar una perfecta dispersión de las NPs, para lo cual se utilizó un sonicador marca Labnet. Enseguida, se añadió cada solución con ayuda de una micropipeta, aplicando 20 ml en cada caja Petri, según el tratamiento correspondiente y realizando una aspersion uniforme sobre las semillas.

Después de imbibir las semillas durante 24 horas, se procedió a realizar la siembra para el ensayo de germinación a través de la técnica “Entre papel”. Para ello, se utilizaron hojas de papel *Anchor* humedecidas en agua destilada, sembrando con ayuda de unas pinzas, 25 semillas por repetición, a las cuales, una vez acomodadas en línea horizontal, se les colocó encima otra hoja de papel humedecido para cubrirlas, doblando ambas hojas en forma de “taco”. Esta acción procedió para las seis repeticiones de cada tratamiento.

Una vez realizada la siembra se acomodaron los tacos en una bolsa de polietileno, utilizando una bolsa por cada tratamiento. Las doce bolsas obtenidas fueron identificadas y ubicadas en una canastilla de plástico, para posteriormente colocarse dentro de una cámara de germinación marca Thermo Scientific, a una temperatura de 25 °C, con un fotoperíodo de 16 horas luz y 8 horas de oscuridad, a una humedad relativa de 75 %.

### **3.6 Evaluación del bioensayo**

#### **3.6.1 Variables evaluadas**

Las variables evaluadas fueron el porcentaje de vigor de germinación (%), el porcentaje de germinación (%), porcentaje de plántulas anormales (%), porcentaje de semillas sin germinar, la longitud media de plúmula (cm), la longitud media de radícula (cm) y el peso de materia seca (mg/plántula).

#### **3.6.2 Metodología para la evaluación de las variables**

##### **a) Vigor de germinación**

Al cuarto día después de la siembra, se realizó el primer conteo para determinar el número de plántulas normales, expresado en porcentaje, a fin de conocer el vigor de germinación de la semilla, que es un parámetro de suma importancia y que representa la velocidad y uniformidad de la germinación, el crecimiento de plántulas y la habilidad de mantener la capacidad de germinación después del almacenamiento (Manfrini, 2004). Se consideran plántulas normales aquellas que poseen la capacidad para germinar y continuar su proceso de desarrollo de manera satisfactoria bajo condiciones favorables de luz, humedad y temperatura. El vigor de germinación se determinó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Vigor de germinación (\%)} = \frac{\text{Número de plántulas normales}}{\text{Número total de semillas sembradas}} \times 100$$

### **b) Por ciento de germinación**

Al séptimo día se realizó la evaluación final del bioensayo, se llevó a cabo el segundo conteo para conocer el número total de plántulas normales, plántulas anormales y el número de semillas sin germinar. El porcentaje de plántulas normales se consideró como el dato útil para estimar el porcentaje de germinación utilizando la fórmula:

$$\% \text{ de Germinación} = \frac{\text{Número de plántulas normales}}{\text{Número total de semillas sembradas}} \times 100$$

### **c) Por ciento de plántulas anormales**

Para obtener el porcentaje de esta variable se consideraron todas aquellas plántulas que presentaron un desarrollo irregular en alguna de sus estructuras morfológicas o que carecen de las mismas, tal es el caso de plántulas con un tamaño dos veces menor al que posee su semilla o que no desarrollaron plúmula o radícula.

### **d) Por ciento de semillas sin germinar**

Las semillas muertas que no mostraron la capacidad para germinar se contabilizaron para la expresión de esta variable en porcentaje.

### **e) Longitud media de plúmula**

Para realizar la estimación de la longitud media de plúmula se midieron todas las plántulas normales de cada tratamiento y repetición, utilizando una tabla con hoja milimétrica graduada en cm.

#### **f) Longitud media de radícula**

En las plántulas normales obtenidas de cada tratamiento se midió la longitud de radícula expresada en cm, con ayuda de una hoja milimétrica graduada en tal magnitud.

#### **g) Peso de materia seca**

Una vez realizada la evaluación del bioensayo, se tomaron las plántulas normales de tres repeticiones por cada tratamiento y se colocaron en bolsas de papel de estraza, previamente identificadas, para situarlas en una estufa de secado marca Riossa modelo H-48, a una temperatura de 72 °C por un período de 24 horas.

Al término de este lapso de tiempo se sacaron las muestras de la estufa y se pusieron en un desecador, a fin de evitar que tomaran humedad del ambiente mientras enfriaban durante 10 minutos. Enseguida se pesó cada muestra en una balanza analítica marca Precisa modelo BJ610C, para conocer el peso de materia seca expresado en mg/plántula.

### **3.7 Análisis del bioensayo**

Los datos obtenidos de las variables evaluadas en el bioensayo, fueron sometidos a un análisis de varianza, para detectar la existencia de diferencias estadísticas entre tipos de NPs y entre concentraciones, de manera adicional se realizó también una comparación de medias utilizando la Prueba estadística de Tukey ( $P < 0.05$ ), para establecer el orden de eficiencia de los tratamientos. Todos los análisis estadísticos fueron efectuados utilizando el programa SAS Inc. (2009).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 1) del bioensayo de semillas de maíz *var.* Jaguan, sometidas a diferentes concentraciones de NPsZnO de tipo comercial y de ingeniería, en la fuente de variación tipo de nanopartícula, los resultados mostraron diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ) para las variables vigor de germinación y longitud de radícula, mientras que para las variables longitud de plúmula y peso seco de plántula se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

En cuanto a la fuente de variación concentración de NPs (0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm) se detectaron diferencias ( $P \leq 0.01$ ) para el vigor de germinación, peso seco de plántula y las longitudes de plúmula y de radícula, el porcentaje de germinación y de plántulas anormales mostraron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ), mientras que el porcentaje, de semillas sin germinar no presentó diferencias estadísticas.

Por otra parte, en relación a la interacción tipo de nanopartícula por concentración, se observaron diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ) para las variables vigor de germinación y longitud media de plúmula y de radícula, mientras que diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) fueron observadas únicamente en el caso de la variable peso seco de plántula (Cuadro 1).

Lo anterior hace referencia de manera clara, a que el tipo de nanopartícula y la concentración son factores esenciales que influyen en la expresión de algunas de las variables fisiológicas relacionadas con la germinación y que fueron evaluadas en este estudio.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*), tratadas con NPsZnO.

<b>F.V</b>	<b>GL</b>	<b>Vigor</b> <b>(%)</b>	<b>Germinación</b> <b>(%)</b>	<b>PA</b> <b>(%)</b>	<b>SSG</b> <b>(%)</b>	<b>PS</b> <b>(mg/plántula)</b>	<b>GL</b>	<b>LP</b> <b>(cm)</b>	<b>LR</b> <b>(cm)</b>
<b>TNANO</b>	1	910.22**	320.88 <sub>NS</sub>	320.88 <sub>NS</sub>	0.01 <sub>NS</sub>	311.11*	1	13.29*	4637.67**
<b>CONC</b>	5	8733.86**	3887.28*	3543.28*	8.53 <sub>NS</sub>	1455.53**	5	1857.96**	2786.66**
<b>TNANO*CONC</b>	5	2992.35**	201.95 <sub>NS</sub>	198.22 <sub>NS</sub>	2.13 <sub>NS</sub>	186.26*	5	403.76**	328.37**
<b>Error</b>	60	120.71	87.82	94.75	6.57	48.20	1522	8.41	14.51
<b>Total</b>	71	12757.14	4497.93	4157.13	17.24	2001.10	1533	2283.42	7767.21
<b>CV (%)</b>		5.69	10.99	72.40	192.35	12.21		24.08	27.02

F.V= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; Vigor= Plántulas normales al primer conteo; Germinación= Plántulas normales al segundo conteo; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; PS= Peso seco de plántula; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; TNANO= Tipo de nanopartícula; CONC= Concentración; TNANO\*CONC= Tipo de nanopartícula\*concentración; ERROR= Error experimental; CV= Coeficiente de variación; NS= Diferencias no significativas; \*= Diferencias significativas (P≤ 0.05). \*\*=Diferencias altamente significativas (P≤ 0.01).

Al efectuar la comparación de medias por concentración (Cuadro 2), se evidenció que la aplicación de NPsZnO, genera una modificación en la respuesta fisiológica para las variables vigor de germinación, porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas anormales, peso seco de plántula, longitud media de plúmula y longitud media de radícula, identificándose diferencias estadísticas en los tratamientos empleados.

En el caso del porcentaje de germinación se encontró que el suministro de NPsZnO en concentraciones de 0.5 a 50 ppm durante la imbibición, genera el mismo efecto, ya que son estadísticamente iguales, excepto el testigo (0 ppm), que particularmente mostró el menor porcentaje, con una media de 49 %.

Estos resultados demuestran que las NPs intervienen principalmente en procesos relacionados con el vigor de la semilla, como lo son la velocidad e intensidad de las actividades y respuestas fisiológicas, la velocidad de germinación, de crecimiento y desarrollo de plántulas y en el peso seco de las mismas.

Lo anterior indica que tratando la semilla con 0.5 ppm, se incrementa el porcentaje de germinación de 49 % (Testigo) a 96 %. Por lo que, aportar a la semilla de maíz durante la imbibición concentraciones bajas de NPsZnO, mejora considerablemente el vigor y el desarrollo de plántula.

Según Delouche (2010) el vigor es el principal componente de la calidad afectado por el proceso de deterioro y es un atributo exclusivo de las semillas capaces de germinar, razón por la cual ostenta un papel esencial en el proceso de germinación, sus efectos determinan el comportamiento de las semillas durante la germinación y emergencia de plántulas, generando una influencia positiva en su posterior crecimiento y desarrollo.

Cuadro 2. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*), tratadas con NPsZnO, por concentración.

CONC (ppm)	Vigor (%)	Germinación (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/plántula)	LP (cm)	LR (cm)
<b>0</b>	21 d	49 b	48a	3a	28.71 d	4.43 e	5.55 d
<b>0.5</b>	93a	96a	3 b	1a	71.91a	13.08a b	15.60a
<b>1</b>	80a b	93a	6 b	1a	68.88a b	12.54 b c	16.33a
<b>5</b>	58 c	88a	11 b	1a	59.40 b c	12.30 c	14.47 b
<b>10</b>	77 b	88a	11 b	1a	51.43 c	10.90 d	12.55 c
<b>50</b>	91a	97a	2 b	1a	60.60a b c	13.35a	15.85a
<b>Media</b>	70	85	14	1	56.8	11.7	14.1
<b>Tukey (<math>\alpha= 0.05</math>)</b>	13.20	11.26	11.69	3.08	12.39	0.75	0.98

CONC= concentración; ppm= partes por millón; Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación= plántulas normales al segundo conteo; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; PS= peso seco de plántula; LP= longitud de plúmula; LR= longitud de radícula. Medias con la misma literal son estadísticamente iguales, Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



Se observó que las concentraciones de 0.5 y 50 ppm (NPsZnO) indujeron una mejor respuesta durante el proceso de germinación, para las variables vigor de germinación y peso seco de plántula, promoviendo también mayor longitud de plúmula y de radícula (Anexos 1, 2, 3, y 4). Observándose mejor respuesta con las NPsZnO comerciales para longitud de plúmula y de radícula (Anexos 3 y 4).

Los resultados obtenidos de este trabajo coinciden con lo mencionado por Sedghi *et al.* (2013), autores que indican que en semillas de soja *Glycine max* al aplicar una dosis de  $1 \text{ g L}^{-1}$  de NPsZnO, se promovieron efectos significativos en la germinación y el crecimiento de plántulas tratadas con NPs, esto hace referencia a que la aplicación del óxido de zinc propició un aumento en el porcentaje de germinación.

Por su parte, Méndez *et al.* (2016) señalan que en plantas de chile *Capsicum annuum*, la aplicación foliar de NPs ZnO + Ag al 2.5% en peso, tuvieron significativamente mayor crecimiento y producción de biomasa total (59.5 %) en comparación con el testigo, atribuyendo el efecto promotor del crecimiento a la actividad del zinc como precursor de la producción de auxinas que generan la elongación celular.

El zinc (Zn) es considerado como un microelemento esencial para los procesos fisiológicos de las células y aunque no posee actividad redox es el único metal de su clase presente en las enzimas, lo que le permite participar en la estructura y/o catálisis de muchos procesos enzimáticos (Barack y Helmke, 1993), entre ellos destaca la catálisis de la síntesis de la serina, precursora del aminoácido triptófano el cual posteriormente es convertido en ácido indolacético (AIA), auxina responsable del crecimiento de brotes y hojas (Srivastava y Singh, 2009).

En este sentido, los resultados obtenidos de este trabajo se atribuyen a la interacción que las nanopartículas ejercen con el metabolismo de la planta al ser absorbidas, lo cual genera una respuesta positiva que da lugar al incremento del vigor y de la velocidad de germinación, aunado a la capacidad que posee el zinc para promover un aumento en los niveles de hormonas vegetales como el ácido indolacético (AIA) en los puntos de crecimiento de la planta como raíces y brotes, propiciando una mayor división y elongación celular que se traduce en un incremento del crecimiento y desarrollo de plántulas y por ende en una mayor producción de biomasa.

Al respecto Vasanth *et al.* (2016) mencionan que las NPs generan influencia en el crecimiento y desarrollo de plántulas a etapas tempranas, resultando además respetuosas con el medio ambiente y compatibles con el sector agrícola debido a la alta eficiencia que poseen para estimular el crecimiento vigoroso en plántulas sometidas a tratamientos con NPs.

Como resultado de la comparación de medias entre los tipos de NPsZnO (comerciales y de ingeniería redondas), y su consiguiente efecto en el proceso de germinación, se observó que existen diferencias estadísticas para las variables vigor de germinación, peso seco de plántula, longitud de plúmula y longitud de radícula particularmente, no así para las variables porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas anormales y porcentaje de semillas sin germinar (Cuadro 3).

Los resultados indican mejor respuesta de las variables relacionadas con el vigor de germinación de las semillas, cuando la imbibición se realiza en soluciones conteniendo NPsZnO de ingeniería (Anexo 5).

En relación a lo mencionado, se observó que las NPs de ingeniería promovieron un mayor incremento en el porcentaje de vigor de germinación en comparación con las NPs comerciales, cuyos valores de la media son de 74 % y 66 % respectivamente, de la misma manera el peso seco de plántulas tratadas con NPs de ingeniería, mostró una mejor respuesta. Dichos resultados se pueden apreciar de manera palpable en las gráficas del apartado de Anexos.

En lo que respecta a porcentaje de plántulas anormales, se determinó que la aplicación de ambos tipos de NPsZnO (comercial y de ingeniería), reduce el número de plántulas con dicha condición, en comparación con el testigo.

Por otro lado, las variables longitud media de plúmula y de radícula manifestaron una mejor expresión al utilizar NPsZnO comerciales, evidenciando un desarrollo de plántulas superior, derivado de una mayor elongación celular durante el proceso de imbibición de las semillas. Con ello se demuestra que el efecto producido por la aplicación de NPs a nivel de semilla es positivo, promoviendo un crecimiento y desarrollo de plántulas favorable desde etapas iniciales, cuando comienza a generarse el proceso de germinación (Anexos 6 y 7).

En relación a lo anterior, se reveló que la aplicación de NPsZnO favorece la velocidad de germinación de las semillas, en comparación con un ensayo de germinación conducido sin tratamiento alguno, propiciando a la par la estimulación del crecimiento y desarrollo a nivel de plántulas, esto debido a que se observó un incremento considerable en la formación de biomasa medida como peso seco de plántula, cuyas diferencias estadísticas respecto al tipo de nanopartícula son evidentes.

Cuadro 3. Comparación de medias de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*), por tratamiento.

<b>TIPONANO</b>	<b>Vigor (%)</b>	<b>Germinación (%)</b>	<b>PA (%)</b>	<b>SSG (%)</b>	<b>PS (mg/plántula)</b>	<b>LP (cm)</b>	<b>LR (cm)</b>
<b>ING</b>	74 <sup>a</sup>	88 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	59.8 <sup>a</sup>	11.6 <sup>b</sup>	12.3 <sup>b</sup>
<b>COM</b>	66 <sup>b</sup>	83 <sup>a</sup>	16 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	53.9 <sup>b</sup>	11.9 <sup>a</sup>	16.1 <sup>a</sup>
<b>Media</b>	70	85	14	1	56.8	11.7	14.1
<b>Tukey (<math>\alpha= 0.05</math>)</b>	5.18	4.41	4.58	1.20	4.77	0.29	0.38

TIPONANO= Tipo de nanopartícula; Vigor= Plántulas normales al primer conteo; Germ= Plántulas normales al segundo conteo; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; ING= NPs de Ingeniería; COM= NPs Comerciales; Medias con la misma literal son estadísticamente iguales, Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

El uso de la nanotecnología y su aplicación en el área de la agricultura es un propósito reciente que ha ido adquiriendo cada vez mayor importancia, no obstante existen ya trabajos que se han desarrollado en esta área y que han mostrado resultados positivos.

Khodakovskaya *et al.* (2009) indican que los nanotubos de carbono multicapa mejoran la germinación y el crecimiento de plántulas de tomate *Solanum lycopersicum* al utilizar una concentración de 10-40 mg/L<sup>-1</sup>, atribuyéndose este resultado a la capacidad que poseen los nanotubos para penetrar la testa de la semilla, lo cual suscita una adecuada absorción de agua y una mejora en la germinación de la semilla.

Pramod *et al.* (2011) reportan que la aplicación de NPsZnO en raíces y brotes de plántulas de soja verde *Vigna radiata* y garbanzo, estimula el crecimiento y desarrollo, sin embargo al utilizar 2000 ppm se produce un efecto tóxico que se presenta en las plántulas, lo cual indica que esta especie responde a la aplicación de NPs de este tipo a bajas dosis.

En este trabajo se demostró que la aplicación de NPsZnO durante la fase de imbibición de la semilla, mejora la expresión de algunas de las variables evaluadas durante la germinación. Esto permite demostrar que las NPs poseen un efecto positivo al aplicarse a diferentes cultivos siempre y cuando se utilicen en las dosis adecuadas para evitar la generación de problemas de fitotoxicidad.

La concentración óptima depende del tipo de nanopartícula y de la especie en estudio, para propiciar un estímulo en su respuesta fisiológica, a través de la evaluación de variables fisiológicas de importancia como el incremento de biomasa, de clorofila y la promoción de crecimiento y desarrollo vegetativo.

## V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que las NPsZnO aplicadas a semillas de maíz *var. Jaguan* a través de solución durante el proceso de imbibición, promueven un aumento en el vigor de germinación, peso seco de plántula y longitud media de plúmula y de radícula, debido al incremento en la división y elongación celular.

Las nanopartículas de ingeniería actuaron de forma positiva durante el bioensayo de germinación mostrando los mejores resultados en la expresión de las variables vigor de germinación y peso seco de plántula, sin embargo, se observó que las NPsZnO de tipo comercial generan una mayor elongación celular, ya que las plántulas tratadas con NPs de este tipo presentaron una mayor longitud de plúmula y de radícula cuyos valores de la media son de 11.7 cm y 14.1 cm, respectivamente.

Las plántulas mostraron una mejor respuesta para la expresión del vigor de germinación, peso seco de plántula y longitud media de plúmula y de radícula, al aplicar 0.5 ppm, lo cual indica que, a bajas dosis se promueve un incremento notorio de estas variables, como resultado del estímulo que las NPs generan durante los procesos de imbibición y de germinación.

Lo anterior, permite concluir que al efectuar la aplicación de NPsZnO éstas funcionan como promotoras de crecimiento y desarrollo, al evidenciar un mayor tamaño de plántulas y un incremento en el vigor y el peso de las mismas. Con ello se sustentan las observaciones realizadas en estudios previos, las cuales hacen referencia a que el vigor es el parámetro de calidad más íntimamente asociado con el proceso de germinación y la viabilidad de la semilla, parámetro que muestra un efecto positivo en la germinación, emergencia y desarrollo de plántulas, al utilizar concentraciones bajas de NPsZnO.

Cabe destacar que el empleo de NPsZnO y de otros elementos metales como el hierro (Fe) y el cobre (Cu), pueden fomentarse para uso en los diversos sistemas de producción agrícola a muy bajas dosis, para reducir el impacto ambiental derivado del excesivo uso de fertilizantes agrícolas empleados para abastecer la demanda que los cultivos tienen de estos y otros elementos esenciales para una óptima nutrición y desarrollo.

Por otro lado, pueden consolidarse como un medio para estimular una mejor respuesta en el crecimiento de las especies vegetales, a través de las diferentes etapas de desarrollo, a fin de explotar al máximo la productividad y el rendimiento de cada especie en particular.

En este trabajo el motivo de estudio fue el cultivo del maíz debido a que es una especie de suma importancia por considerarse el sustento de la alimentación de millones de personas y la materia prima estratégica de la ganadería y la industria de alimentos, aunque la tendencia se orienta a la búsqueda de encontrar el tipo de nanopartículas y las concentraciones óptimas para cada especie en particular, que promuevan un crecimiento y desarrollo óptimo a través de las diferentes etapas fenológicas del cultivo, a fin de explotar al máximo su potencial genético y su productividad.

## VI. LITERATURA CITADA

- Agrimundo. 2016. La nanotecnología como una opción para una agricultura más eficiente. Inteligencia competitiva para el sector agropecuario. Agrimundo-FAO. Disponible en: <http://www.agrimundo.cl>
- Arias García, F. I., y M. G. De la Rosa Álvarez. 2015. Toxicidad de nanopartículas metálicas en maíz y girasol, especies de interés económico y alimentario de la región del Bajío. *Jóvenes en la ciencia* 1 (2): 424-428.
- Ávalos, A., A. I. Haza, D. Mateo y P. Morales. 2013. Nanopartículas de plata: aplicaciones y riesgos tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias* 7 (2): 1-23.  
Doi: [http://dx.doi.org/10.5209/rev\\_RCCV.2013.v7.n2.43408](http://dx.doi.org/10.5209/rev_RCCV.2013.v7.n2.43408)
- Barak, P., and P. Helmke. 1993. The Chemistry of zinc. In: *Zinc in Soil and Plants*. Kluwer Academic Publishers. pp.1-13.
- Brunel, J. 2015. Nanopartículas mejoran el contenido de nutrientes y el crecimiento de plántulas de tomate. *Food News*. Disponible en: <http://www.foodnewlatam.com>
- Cifuentes, Z., L. Custardoy, J. M. De la Fuente, C. Marquina, M. R Ibarra, D. Rubiales, A. Pérez de Luque. 2010. Absorption and translocation to the aerial part of magnetic carbon-coated nanoparticles through the root of different crop plants. *Journal of Nanotechnology* 8 (26): 1-8.  
Doi: <https://doi.org/10.1186/1477-3155-8-26>
- Cimav (Centro de Investigación en Materiales Avanzados). 2008. Diagnóstico y prospectiva de la nanotecnología en México. Disponible en: <http://www.nanored.org.mx>
- Delouche, J.C. 2016. Germinación, deterioro y vigor de semillas. *Revista Seed News* 6 (6):160-903.



- Di Sia, P. 2017. Nanotechnology among innovation, health and risks. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. Elsevier 237: 1076-1080.  
Doi: <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2017.02.158>
- Gómez Villarraga, F. 2011. Nanopartículas metálicas y sus aplicaciones. *Innovación y Ciencia*. Disponible en:  
[https://innovacionyciencia.com/documentos/nanoparticulas\\_metalicas\\_y\\_sus\\_aplicaciones.pdf](https://innovacionyciencia.com/documentos/nanoparticulas_metalicas_y_sus_aplicaciones.pdf)
- Gutiérrez Praena, D., A. Jos, S. Pichardo, M. Puerto, E. Sánchez Granados, A. Grilo, A. M. Carneán. 2009. Nuevos riesgos tóxicos por exposición a nanopartículas. *Revista de Toxicología*. Redalyc 26 (2-3): 87-92.
- He, L., Y. Liu., A. Mustapha, and M. Lin. 2011. Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. *Microbiological Research*. Elsevier 166: 207-215.  
Doi: 10.1016/j.micres.2010.03.003
- Hernando Grande, A. 2007. Nanotecnología y nanopartículas magnéticas: la física actual en la lucha contra la enfermedad. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 101 (2): 321-327.
- Hernández Juárez B. 2011. Nanopartículas semiconductoras, coloidales y aplicaciones. *An. Quím. Real sociedad Española de Química* 107 (3): 229-236.
- Khodakovskaya, M., E. Dervishi, M. Mahmood, Y. Li, Z. Watanabe, A. S. Biris. 2009. Los nanotubos de carbono son capaces de penetrar la capa semilla de la planta y afectar drásticamente la germinación de semillas y crecimiento de las plantas. *ACS Nano*: 3 (10): 176-322.
- Lamas Calzada, S. 2010. Nanotecnología en agricultura y alimentación. *Nanotecnología: Innovación Tecnológica y Transformación Social en I-Europa*. Disponible en:

<https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2010/06/11/nanotecnologia-en-agricultura-y-alimentacion/>

Liu, R., H. Zhang, and R. Lal. 2016. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) Seed germination: nanotoxicants or nanonutrients? R. Water Air Soil Pollut Springer 227:42. Doi: 10.1007/s11270-015-2738-2

Manfrini, D. 2004. Aspectos a tener en cuenta: Análisis de semillas. Revista del Plan Agropecuario. Instituto Nacional de Semillas 56-58 p.

Mejía, Y., N. Cabrera, A. M. Toledo, O. J. Duany. 2009. La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. Revista Cubana de Salud Pública. Redalyc 35 (3): 1-9.

Méndez Argüello, B., I. Vera Reyes, E. Mendoza Mendoza, L. A. García Cerda, B. A. Puente Urbina y R. H. Lira, Saldívar. 2016. Promoción de crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. Nova Scientia 8 (2): 140-156.

Mendoza Uribe. G., y J. L. Rodríguez López. 2007. La nanociencia y la nanotecnología: Una nueva revolución en curso. Perfiles Latinoamericanos. Scielo 15 (29): 161-186.

Mukherjee, A., I. Shinha, R. Das. 2015. Application of Nanotechnology in Agriculture: Future Prospects. Department of Chemical Engg, Haldia. Institute of Technology. pp. 13.

Nanoquímica. 2012. Métodos químicos para síntesis de nanopartículas. La nanotecnología en la química. Disponible en:  
<https://nanoquimica68.wordpress.com/>

O' Leary, M. 2016. Maíz: De México para el mundo. CIMMYT. International maize and Wheat Improvement Center. Disponible en:  
<http://www.cimmyt.org/es/maiz-de-mexico-para-el-mundo/>

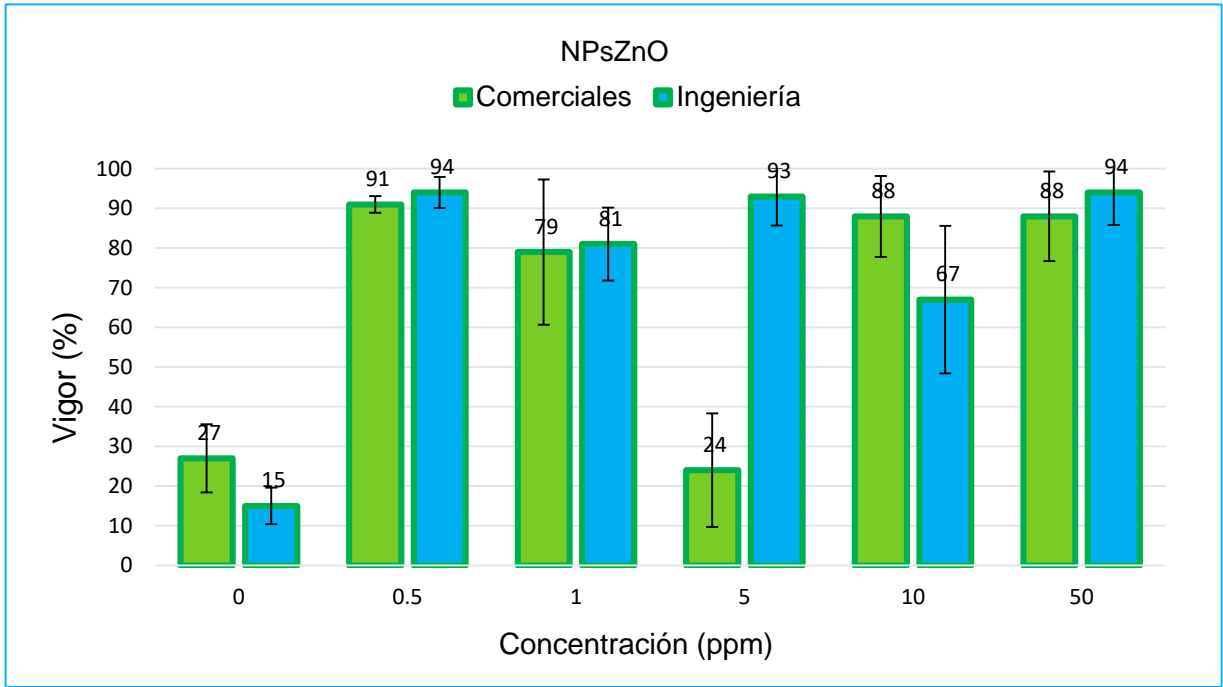
- Passaretti, M. G., L. A. Castillo y A. E. Ciolino. 2017. Una mirada al universo nanotecnológico. Parte I. Revista Con Ciencia...Tu mundo. Disponible en: <http://revistaconciencia.com/una-mirada-al-universo-nanotecnologico--parte-1-/>
- Peng, C., D. Duan, C. Xu, Y. Chen, L. Sun, H. Zhang, X. Yuan, L. Zheng, Y. Yang, J. Yang and X. Zhen. 2016. Translocation and biotransformation of CuO nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) plants. Environmental Pollution. Elsevier, 197:99-107. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.008>
- Pérez Taborda, J. A., J. L. Gallego, W. Stive, H. Riascos. 2008. Películas nanoestructuradas de óxido de zinc (ZnO). Universidad Tecnológica de Pereira. Scintia et Technica Año XIV (39): 416-421.
- Pérez, A. 2016. Nanotecnología: Aplicaciones en agricultura e investigación vegetal Disponible en: <http://www.ias.csic.es>
- Pramod, M., S. K. Dhoke, A. S. Khanna, and J. C. Tarafdar. 2011. Effect of nano ZnO on growth of mung bean (*Vigna radiata*) and chickpea (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. Applied Biological Research 13 (2):54-61.
- Prasad, R., V. Kumar, and K. S. Prasad. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects. African Journal of Biotechnology 13 (6): 705-713. Doi: 10.5897/AJBX2013.13554
- Quintana, M., L. Hirschbein y E. Pérez. 2008. Nanopartículas: principios y aplicaciones. Revista Ciencia y Desarrollo Vol. 34 (221).
- Quintili, M. 2012. Nanociencia y Nanotecnología...Un mundo pequeño. Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Scielo (42): 125-155.
- Rao, N. R., A. Müller and A. K. Cheetham. 2004. The chemistry of nanomaterial's. Weinheim: Wiley- VHC, Vol. 1 and 2.

- Rincón Sánchez, F., N. A. Ruiz Torres, R. Cuellar Flores y F. Zamora Cancino. 2014. "Jaguan", variedad criolla mejorada de maíz para áreas de temporal del sureste de Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Scielo 37 (4): 403-405.
- Sánchez, Y., N. Cabrera, A. M. Toledo y O. J. Duany. 2009. La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. *Revista Cubana Salud Pública*. Scielo 35 (3).
- Sarabia Castillo, C. R., y F. Fernández Luqueño. 2016. Efecto de nanopartículas sobre la simbiosis Rhizobia-leguminosa y morfología de *Phaseolus vulgaris* L., *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 3 (2):122-132.
- Schmid, G. 2004. *Nanoparticles. From theory to application*. Weinheim: Wiley-VHC
- Sedghi, M., M. Hadi, S. G. Toluie. 2013. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seed under drought stress. *Annals of West University of Timisoara, ser. Biology* 16 (2): 73-78.
- Serratos, J. A. 2009. *El origen y la diversidad del maíz en el continente americano*. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Greenpeace, Ciudad de México. Editorial Review, 33 p.
- Srivastava, A. K., and S. Singh. 2009. Zinc nutrition in Nagpur mandarin on Haplustert. National Research Centre for Citrus, Nagpur, Maharashtra, India. *Plant Nutrition* 32: 1065-1081.
- Takeuchi, N., y M. E. Mora Ramos. 2011. Divulgación y formación en nanotecnología en México. *Red NANODYF-CYTED Mundo Nano* 4 (2): 59-64.
- Vasanth, N., G. Melchias, y P. Kumaravel. 2016. Evaluación of silver bio-nanoparticles synthesized with the mediation of *Zizyphus jujuba* fruit extract in bactericidal compatibility and seed viability. *Indo American Journal of Pharmaceutical Research* 6 (7): 6125-6135.

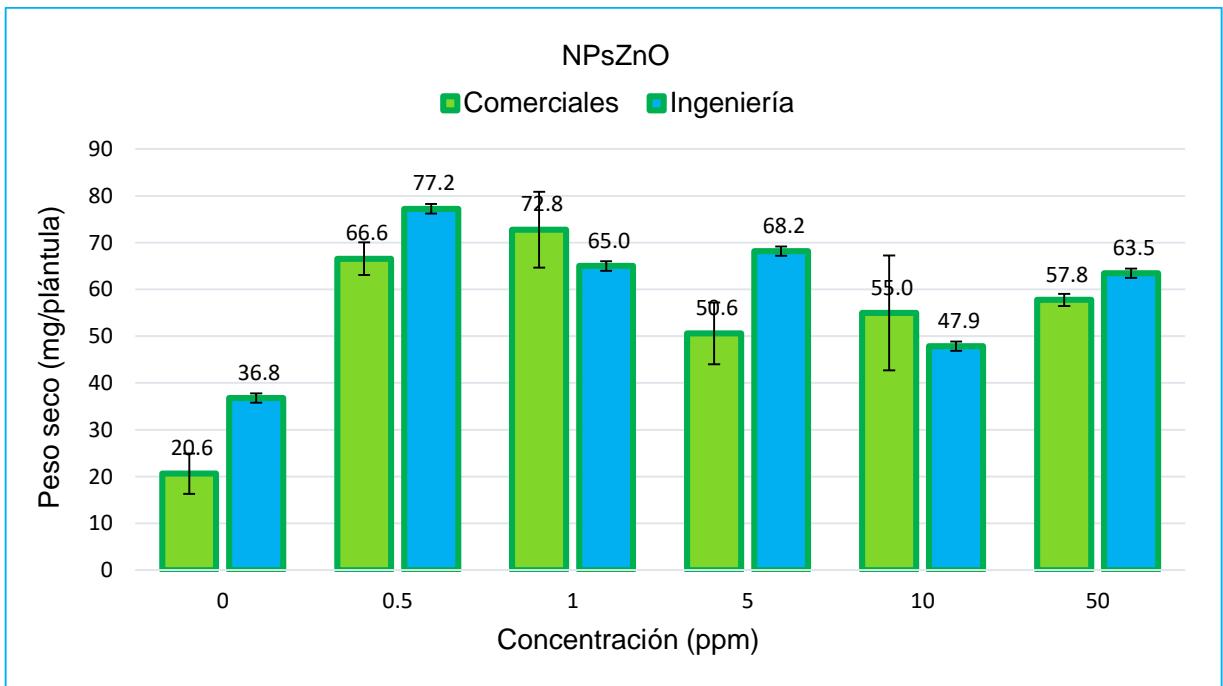
- Vicente Manzano, M. C. 2009. El óxido de zinc. Nanotecnología: Innovación Tecnológica y Transformación Social en I-Europa. Disponible en:  
<https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2009/11/03/el-oxido-de-zinc/>
- Windebank, S., and B. Ward. 2004. Nanotechnologies bring great potential and need for responsible development. Royal Academy of Engineering. Disponible en:  
<https://www.raeng.org.uk>
- Zágayo Lau E., y G. Foladori. 2010. La nanotecnología en México: un desarrollo incierto. Economía, Sociedad y Territorio Scielo 10 (32): 143-178.
- Zanella, R. 2012. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. Mundo nano 5 (1): 69-81.

## VII. ANEXOS

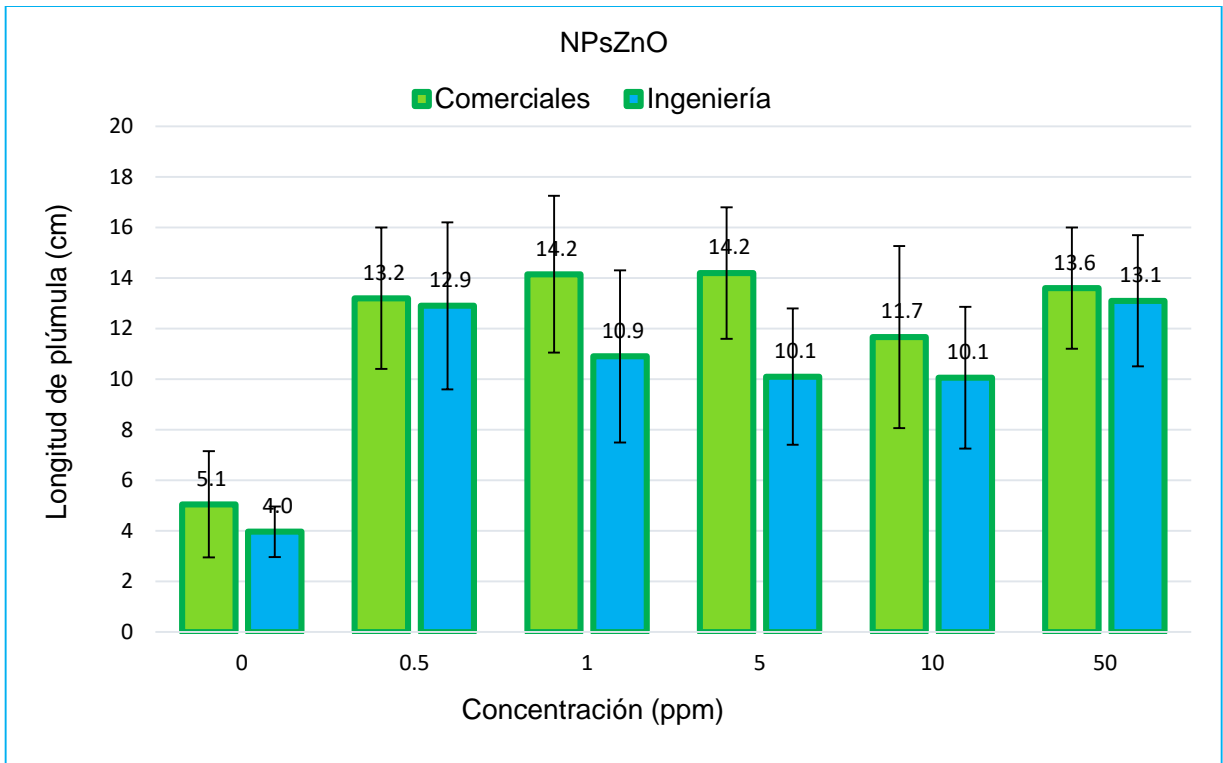
Anexo 1. Porcentaje de vigor de germinación por tipo de NPsZnO y por concentración.



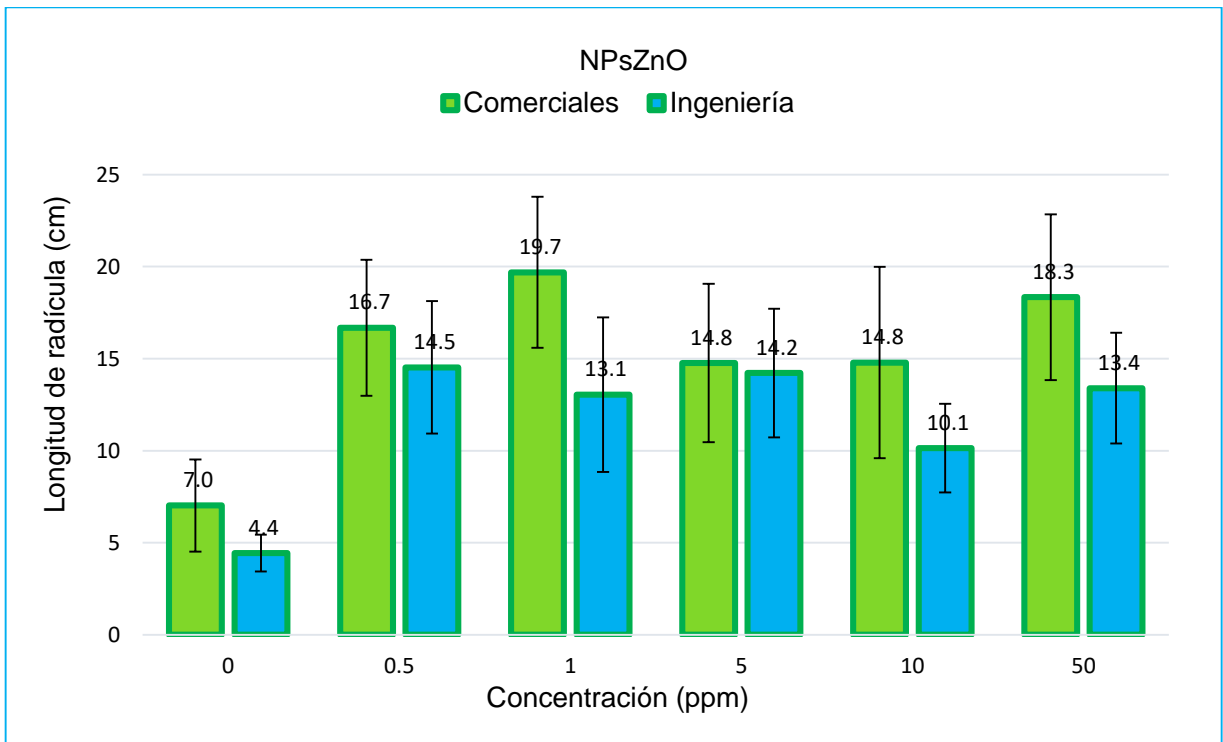
Anexo 2. Peso seco (mg/plántula) por tipo de NPsZnO y por concentración.



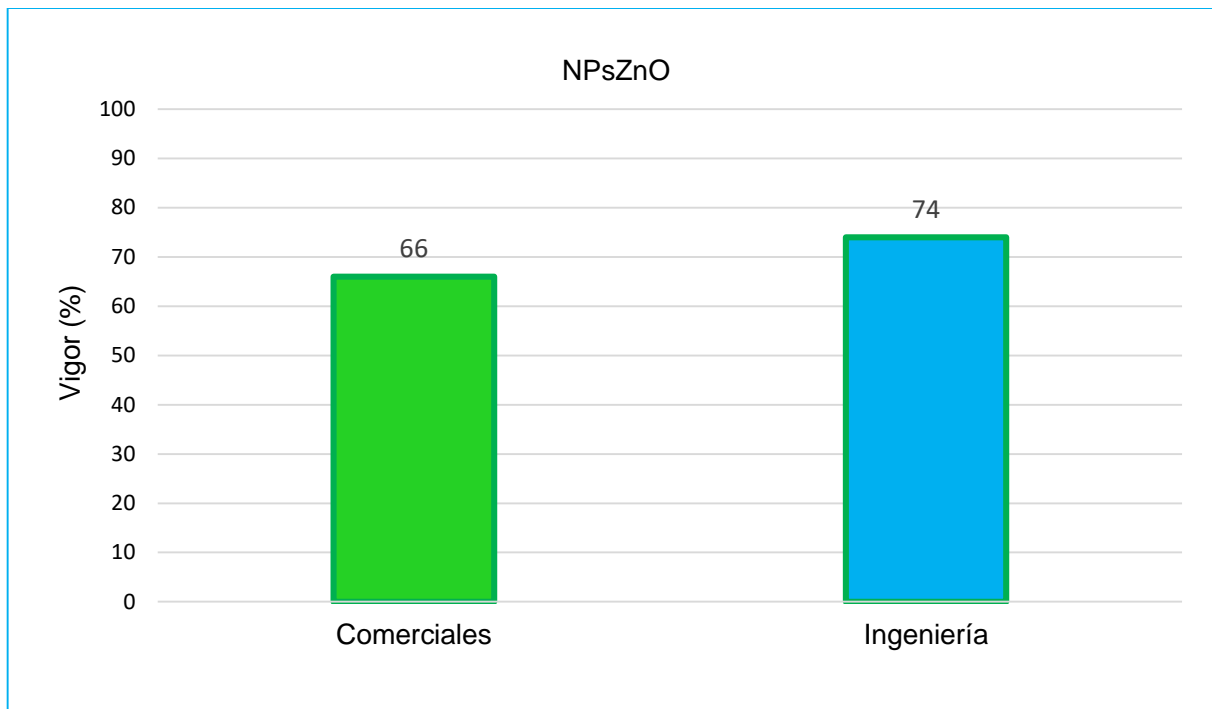
Anexo 3. Longitud de plúmula (cm) por tipo de NPsZnO y por concentración.



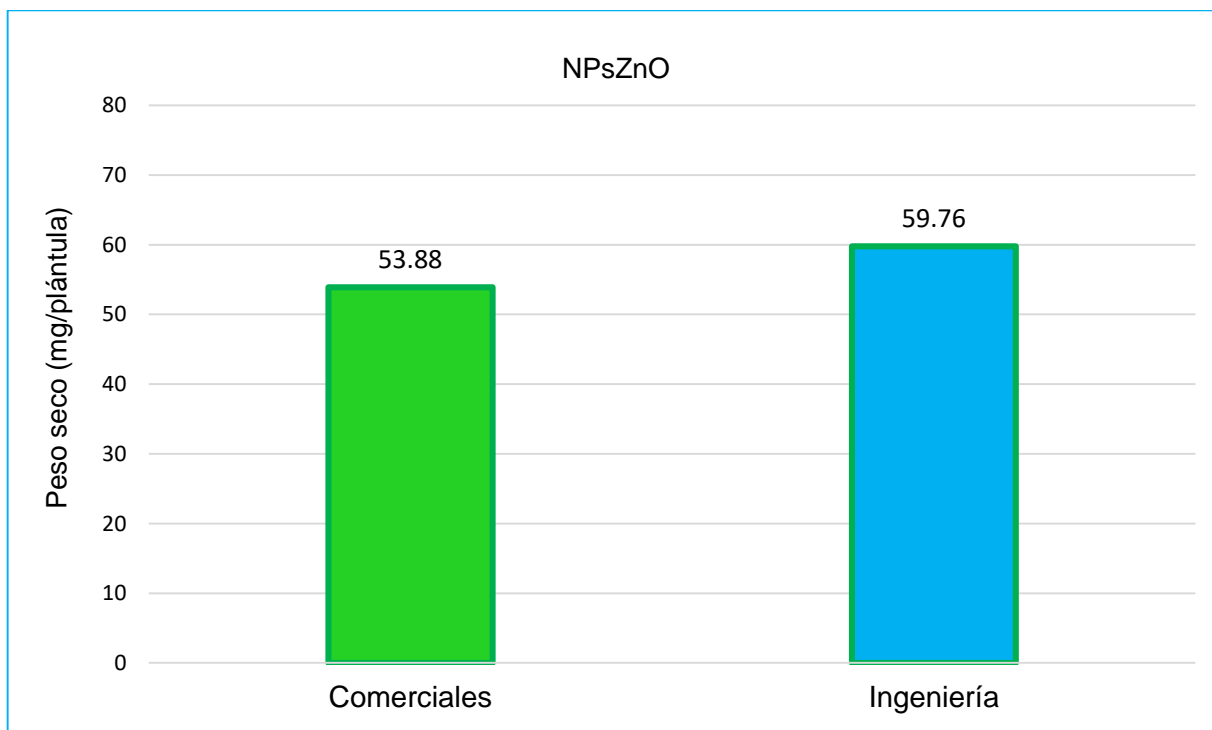
Anexo 4. Longitud de radícula (cm) por tipo de NPsZnO y por concentración.



Anexo 5. Porcentaje de vigor de germinación por tipo de NPsZnO.



Anexo 6. Peso seco (mg/plántula) por tipo de NPsZnO.





Anexo 7. Longitud de plúmula y de radícula (cm) por tipo de NPsZnO.

