

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Modulación de la Germinación y Desarrollo de Plántulas en Ambientes Salinos de
Semillas de Maíz Tratadas con Nanopartículas de Óxido de Magnesio

Por:

DANIEL ROGELIO DIAZ ALCON

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Modulación de la Germinación y Desarrollo de Plántulas en Ambientes Salinos de
Semillas de Maíz Tratadas con Nanopartículas de Óxido de Magnesio

Por:

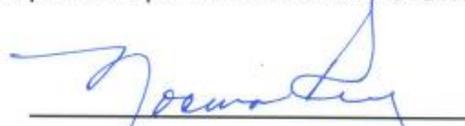
DANIEL ROGELIO DIAZ ALCON

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



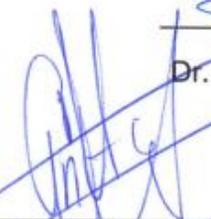
Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor Principal



Dr. Froylán Rincón Sánchez
Coasesor



Dr. Josué Israel García López
Coasesor



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



Saltillo, Coahuila, México.
Febrero, 2022

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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, gráficas, 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Daniel Rogelio Diaz Alcon

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Sra. Elia Hosanna Alcon Torrez y Sr. Edmundo Diaz Serrano

Quienes con su confianza, cariño y apoyo me han ayudado a cumplir mis metas, dándome la oportunidad de seguir mis estudios, convirtiéndome en persona de provecho y sobre todo por ser un ejemplo de vida a seguir.

A MIS HERMANOS

Edmundo Diaz, David Diaz Alcon, Diego Diaz Alcon, Ximena Diaz Alcon y Maritza Diaz Alcon

Gracias por el apoyo que me brindaron en la trayectoria de mi carrera, por su cariño de hermanos y por sus palabras de aliento que día a día me motivaron para seguir adelante.

A MIS ABUELOS

Que han sido como unos segundos padres, cuidándome desde niño y brindándome, cariño, confianza y consejos que me han alentado a seguir con mi formación profesional.

A MIS AMIGOS

Por sus gran a amistad y apoyo que me han brindado en la trayectoria de esta etapa final, además de sus consejos y que estuvieron en todo momento, sobre todo que creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, dándome las fuerzas, voluntad y perseverancia, bendiciéndome todos los días e iluminarme en el camino y sobre todo brindarme salud.

A MI FAMILIA

Por la confianza, apoyo y consejos que me han impulsado a terminar mis estudios y siempre han estado conmigo en todo momento.

A MIS AMIGOS

Que siempre estuvieron en todo momento, en especial a Osorio, Omar, Erick, Manuel, Marco, Heriberto, Alonso y Chihuas por su inmenso apoyo y que gracias a ellos mi estancia universitaria fuera agradable e inolvidable.

A MI ALMA MATER

Por abrirme las puertas, brindarme las herramientas para mi formación profesional, por los buenos momentos y alegrías que pase rodeándome de grandes personas.

A La DRA. NORMA ANGÉLICA RUÍZ TORRES

Por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y brindarme su valioso tiempo, dedicación, paciencia y sus conocimientos. Además de sus enseñanzas que me ha ayudado en mi formación y que siempre tendré presente, sin duda una gran maestra.

ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Maíz (<i>Zea mays</i> L.).....	3
2.2 Nanotecnología (NT)	3
2.3 Nanopartículas (NPs)	4
2.4 Aplicaciones de nanopartículas en la agricultura.....	4
2.5 Salinidad.....	6
2.6. Efecto de las sales en la agricultura	6
2.7. Efecto de las sales en la germinación de semillas	7
2.8. Clorofila	8
III. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Ubicación.....	10
3.2. Material genético	10
3.3. Preparación de soluciones salinas	10
3.4. Preparación de solución con NPs.....	10
3.5. Proceso de imbibición.....	11
3.6. Proceso de siembra.....	11
3.7. Variables evaluadas en el bioensayo	11
3.7.1. Vigor de germinación:.....	11
3.7.2. Germinación (GER):	11
3.7.3 Plántulas de alto vigor (PAV):	12
3.7.4 Plántulas de bajo vigor (PBV):.....	12
3.7.5. Plántulas anormales (PA):	12
3.7.6. Semillas sin germinar (SSG):	12
3.7.7. Contenido de clorofila (CC):	12
3.7.8. Longitud media de plúmula (LV) y Longitud media de radícula (LR):	12

3.7.9. Peso seco de plúmula (PSP) y de radícula (PSR):.....	12
3.8 Análisis estadístico	13
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. BIBLIOGRAFÍA	28
VII. ANEXOS	33

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables fisiológicas de semilla de maíz evaluadas en el laboratorio con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).....	15
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para contenido de biomasa en plántulas de maíz evaluadas en el laboratorio con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).....	16
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en plántulas con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).....	17
Cuadro 4. Medias por conductividades eléctricas para variables fisiológicas evaluadas en semillas y plántulas de maíz en el laboratorio.....	22
Cuadro 5. Medias por conductividad eléctrica para la evaluación del contenido de materia seca acumulada en plántulas.....	23
Cuadro 6. Comparación de medias de los tratamientos por concentración de NPs, en las variables fisiológicas evaluadas en semilla de maíz en el laboratorio.....	24
Cuadro 7. Comparación de medias de los tratamientos por concentración de NPs, para la variable contenido de clorofila en plántulas de maíz evaluadas en el laboratorio.....	25

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Interacción NPsMgO x NaCl en la variable vigor de germinación.....	33
Anexo 2. Interacción NPsMgO x NaCl en la variable germinación.....	33
Anexo 3. Efecto de las NPsMgO en la variable plántulas de alto vigor expuestas a ambientes salinos.....	34
Anexo 4. Efecto de las NPsMgO en la variable plántulas de bajo vigor expuestas a ambientes salinos.....	34
Anexo 5. Interacción NPsMgO x NaCl en la acumulación de materia seca de plúmula.....	35
Anexo 6. Interacción NPsMgO x NaCl en la acumulación de materia seca de radícula.....	35
Anexo 7. Efecto de las NPsMgO aplicadas a semillas de maíz y desarrolladas en diferentes ambientes de NaCl, en la relación peso seco de plúmulas/peso seco de radícula.....	36
Anexo 8. Efecto de la interacción NPsMgO x NaCl en el índice de vigor.....	36
Anexo 9. Interacción NPsMgO x NaCl en el contenido de clorofila.....	37

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de determinar el efecto de las nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), en variables fisiológicas de la germinación, desarrollo de plántula, y contenido de clorofila, en ambientes salinos inducidos con cloruro de sodio (NaCl), en semillas de maíz.

Para cada tratamiento se colocaron 100 semillas de maíz en cajas de Petri y se imbibieron en NPsMgO (0 y 200 ppm), durante 21 horas, se prosiguió con la siembra, humedeciendo papel Anchor en diferentes soluciones de NaCl a varias conductividades eléctricas (CE) (0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0), después se sembraron 25 semillas por repetición, entre dos capas de papel, quedando 4 repeticiones por tratamiento, estas se introdujeron en bolsas, dentro de contenedores de plástico, en una cámara bioclimática a 25°C.

El estudio se estableció en un diseño completamente al azar, con arreglo factorial 2 x 13. Las variables evaluadas fueron: vigor de germinación, germinación (plántulas normales), plántulas de alto y de bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar, contenido de clorofila, longitud media de plúmula, longitud media de radícula y peso seco de plántula. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos, y comparaciones de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el programa SAS (2004).

Se observó que los niveles de CE originaron diferencias en las respuestas a la salinidad, en las variables relacionadas con el vigor de las plántulas y el contenido de clorofila. Al germinar semillas en ambientes con diferentes CE, se observó que en un rango de 0.25 a 0.75 mS/cm, mejoró la expresión de la capacidad germinativa, el vigor, la acumulación temprana de materia seca, y el contenido de clorofila. Sin embargo, imbibir semillas de maíz en 200 ppm de NPsMgO, inhibió la germinación, el desarrollo de plántulas y el contenido de clorofila.

Palabras clave: Nanopartículas, salinidad, vigor, cloruro de sodio, óxido de magnesio.

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es una especie de gran importancia, en México se produce en la mayoría de los estados, y presenta una gran diversidad genética. Es una de las especies que contribuye en gran medida a la alimentación del ser humano, por lo que año con año se trata de incrementar la producción, buscando nuevas herramientas que ayuden sin afectar el medio ambiente.

La salinidad de los suelos es uno de los factores abióticos que inciden negativamente en la producción agrícola, afecta principalmente el desarrollo de las plantas al estar expuestas a un estrés continuo producido por diferentes iones (Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) que se acumulan en el medio de desarrollo de la raíz, ya sea por agua de riego o por el uso desmedido de productos químicos.

La nanotecnología ha resultado ser una técnica de gran interés en la agricultura, ya que promete sustituir a fertilizantes y plaguicidas químicos, que tienen efectos en la degradación de suelos y el medio ambiente. Además, son de menor costo. Es por ello, que se han venido incorporando al sistema agroalimentario estos nuevos materiales de tamaños nanométricos que cuentan con propiedades fisicoquímicas, tales como: menor tamaño, poder ionizante y mejor absorción.

Importante es mencionar que se han realizado diversos trabajos de investigación utilizando nanopartículas, para determinar su efecto en el desarrollo de plantas, sin embargo, hay pocos estudios para identificar su poder como moduladores de la germinación y el crecimiento, en ambientes salinos

En este estudio se evaluó el efecto de las nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), en variables fisiológicas de la germinación, desarrollo de plántula, y contenido de clorofila, en ambientes salinos inducidos con cloruro de sodio (NaCl), para conocer si existe el efecto modulador.

1. Objetivo general

- Determinar el efecto de las nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), en variables fisiológicas relacionadas con la germinación, el desarrollo de plántula, la acumulación de materia seca, y el contenido de clorofila, en ambientes salinos inducidos con cloruro de sodio (NaCl⁺).

1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la imbibición de semillas de maíz en suspensiones con NPsMgO, y su acción como promotor o inhibidor del vigor, la germinación, el desarrollo de plántulas, y el contenido de clorofila, en ambientes salinos.

Determinar la respuesta de la acumulación temprana de materia seca en plántulas, a la aplicación de NPsMgO durante la imbibición, y posterior germinación en ambientes con diferentes conductividades eléctricas.

1.3. Hipótesis

- La imbibición de semillas con NPsMgO, promueve y mejora procesos fisiológicos de la germinación, el vigor, y el desarrollo de plántulas de maíz, en ambientes salinos de diferentes conductividades eléctricas.
- La imbibición de semillas con NPsMgO, no promueve ni mejora los procesos fisiológicos de la germinación, el vigor, y el desarrollo de plántulas de maíz, en ambientes salinos de diferentes conductividades eléctricas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Maíz (*Zea mays* L.)

México se caracteriza por su amplia y rica variación geológica, orográfica, ambiental, y es uno de los países con mayor diversidad biológica en el mundo. Es en México dónde se ha reunido el mayor número de evidencias del uso y conocimiento del maíz, que confirman que en su territorio se originó este cereal (CONABIO, 2020).

El maíz es de gran importancia en el mundo, proporciona elementos nutritivos a los seres humanos, a los animales y es una materia prima básica de la industria; es un cultivo representativo de México por su importancia económica, social y cultural.

2.2 Nanotecnología (NT)

La NT se ha definido como toda aquella tecnología que se relaciona con nuevos materiales, sistemas y procesos que operan a una escala de 100 nanómetros (nm) o menos, es por ello que la manipulación de materiales y la creación de estructuras son a nanoescala. Las propiedades, efectos y materiales de partículas a nanoescala difieren de partículas más grandes con igual composición (Lugo-Medina *et al.*, 2010).

La NT es una disciplina relativamente reciente, con aplicaciones para diseñar novedosos materiales, componentes y avances fundamentales en aplicaciones en la física, química, medicina, el ambiente, biología molecular, industrias químicas etc., (Mendoza *et al.*, 2006).

En las últimas décadas, la comunidad científica se ha enfocado en el área de investigación y desarrollo de la nanociencia y las nanotecnologías. Gracias a estos desarrollos, se han generado avances, en una amplia gama de progresos que ayudan a las necesidades de las personas y contribuyen en los objetivos de competitividad y desarrollo sostenible de las naciones (Méndez *et al.*, 2014).

La NT ha generado gran interés en el desarrollo de productos de uso agrícola, ya que representa una oportunidad para aminorar el uso de agroquímicos sintéticos,

con la posibilidad de reducir el impacto ambiental, al 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).

2.3 Nanopartículas (NPs)

Las NPs son estructuras con tamaños inferiores a 100 nanómetros, que pueden ser sintetizadas a partir de diferentes materiales, incluyendo metales. Las NPs por su tamaño puede tener mayor reactividad química y ser más bioactivas, a diferencia de las partículas más grandes, por lo que tienen mejor acceso a cualquier organismo, y tienen probabilidad de entrar en células, tejidos, y órganos (Gómez *et al.*, 2018).

Las NPs cuentan con propiedades fisicoquímicas tales como: menor tamaño, estabilidad química mejorada, poder ionizante, tolerante a pH y mejor absorción. Estas características mejoradas tienen un gran potencial como nanofertilizante, para mejorar los parámetros generales de crecimiento de las plantas (Faria *et al.*, 2021).

En la agricultura, las NPs han demostrado ser importantes también como nanoplaguicidas. Además, se han empleado para incrementar la productividad de los cultivos utilizándolas en estos, ya que muchas de ellas juegan un papel como nutrientes esenciales de las plantas, además de emplearse para sustituir productos convencionales que ofrecen menores rendimientos y mayor impacto ambiental en comparación con el uso de estos nanomateriales (Mukhopadhyay *et al.*, 2014).

2.4 Aplicaciones de nanopartículas en la agricultura

Se han realizado diversos trabajos para evaluar el efecto de la aplicación de diferentes tipos de NPs en procesos como la germinación, el crecimiento de plántulas, y la producción de biomasa. Sin embargo, pocos estudios se han llevado a cabo con NPs MgO .

En un trabajo realizado en el cultivo del chile, la aplicación de NPs ZnO en conjunto con Ag a concentraciones de 1.5 y 2.5 % molar, actuaron de manera positiva,

mejorando el crecimiento y la producción de biomasa seca (Méndez-Argüello *et al.*, 2016).

Asimismo, hay evidencia de que las NPsZnO prolongan la vida útil de *lisianthus (Eustoma grandiflorum)*, al mantener la calidad del tallo floral y las hojas, mediante una mayor absorción de agua y ganancia de peso. Además, estimula la apertura de las flores y una coloración más verde en hojas en comparación con tratamientos convencionales aplicando en soluciones florero (Soriano-Melgar *et al.*, 2018).

También se observó que altas concentraciones de NPsZnO mejoran el rendimiento, la calidad comercial y la nutraceútica de los frutos de melón. La aplicación de NPsZnO mediante aspersión foliar, es una manera de enriquecer los frutos y disminuir la deficiencia de este micronutriente en la población del cultivo (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Estrada y Méndez (2016) menciona que las NPsAg brindan protección a semillas de maíz, bajo estrés por altas temperaturas y humedad mejorando la germinación e incrementando la longitud radicular y la producción de biomasa seca. Además, ayudan a mejorar el vigor y evita la etiolación, atribuyendo estos aspectos para hacer frente a fenómenos meteorológicos al momento de las plantaciones.

Por otra parte, la aplicación de NPsCs en semillas de triticale, mostró efecto positivo a concentraciones de 0.2 mg ml^{-1} en la germinación, porcentaje de vigor y contenido de pigmentos fotosintéticos (Ramírez *et al.*, 2021).

En un estudio realizado con semillas de tomate, se observó que las NPsFeO cero valentes influyen de manera positiva, ayudando a la germinación, desarrollo de hipocotíleo, y raíces con presencia de cromo (Miguel-Rojas *et al.*, 2020).

En estudios sobre absorción de nutrientes, se encontró que las plantas de tomate se ven afectado por la presencia de arsénico, en soluciones nutritivas, en plantas de tomate, causando disminución de biomasa. Sin embargo, se pudo revertir con la aplicación de NPsSiO₂, ya que favoreció la absorción de nutrientes y la concentración de macronutrientes en raíz y hojas (González-Moscoso *et al.*, 2021).

El rendimiento agronómico de plantas de pepino injertadas se incrementó al tratarlas con NPsSe, afectando positivamente la longitud del fruto, el diámetro del tallo y el peso fresco, estas variables son favorecidas aplicando dosis de hasta de 5 mg de estas nanopartículas. Además, se disminuyó el área foliar, atribuyendo a hacer una planta más eficiente al uso y consumo del agua (Treviño *et al.*, 2021).

2.5 Salinidad

En la actualidad la agricultura enfrenta serios problemas donde destacan, la sequía, salinidad y factores climáticos extremos, ya que son los principales tipos de estrés, que ocasiona una disminución en la producción y calidad de los cultivos. La salinidad es uno de los principales tipos de estrés que generan problemas en el crecimiento y productividad de los cultivos (Shrivastava y Kumar, 2015).

La salinidad es uno de los factores que influye en la producción, principalmente en regiones de clima árido y semiárido, por lo que se manifiesta en bajos rendimientos en los cultivos, escasas de semilla y en ocasiones pérdidas de variedades (Velázquez-Ventura *et al.*, 2020).

La salinidad de un suelo se puede estimar indirectamente a través de la conductividad eléctrica (C.E), y este valor puede servir de base para la planificación de un manejo que contrarreste los efectos de esta en la producción del cultivo. La C.E. aumenta conforme a la salinidad, y esta, se estima aplicando un campo electromagnético en una temperatura estándar de 25 °C, teniendo como resultados lecturas en unidades dS m^{-1} (Visconti y De-Paz, 2018).

2.6. Efecto de las sales en la agricultura

La salinidad provoca cambios fisiológicos y bioquímicos, mediante la inducción de estrés en los metabolismos de las plantas afectando su subsistencia, por lo que han desarrollado mecanismos de tolerancia (Lamz *et al.*, 2013). En maíz, el exceso de salinidad provocó alteraciones en la anatomía y ultraestructura foliar y radical del maíz, presentando una disminución de hasta un 34% en el tamaño de la epidermis adaxial y abaxial de la lámina foliar, la disminución del tamaño de la lámina foliar fue de aproximadamente un 32%, en comparación con las plantas control, se observó una desagregación a nivel de células del mesófilo, junto con una

disminución del tamaño de las células de la vaina del haz de hasta un 12%, y pérdida de la organización de los cloroplastos en las células. A nivel radical, se produjo una disminución del grosor de la raíz, se afectó el número y estructura de los vasos xilemáticos y un engrosamiento significativo de la epidermis (Cárcamo *et al.*, 2009).

Por otra parte, en un trabajo realizado en el cultivo de la papa, se observó el efecto negativo de las sales sódico-alcalinas, la formación de tubérculos, por tuberización negativa, desarrollo foliar incompleto y disminución del periodo de crecimiento del tubérculo por senescencia foliar temprana, ya que los tubérculos no recibieron fotoasimilados. Estas alteraciones se debieron a las altas concentraciones de sal y a que estas inhiben procesos relacionados con la tuberización (Sánchez *et al.*, 2008).

En fresa se ha observado que la acumulación de NaCl en plantas disminuye el vigor, retarda el crecimiento y reduce la producción de biomasa. Además, provoca lesiones necróticas en los bordes de las hojas maduras, al haber concentraciones altas de iones tóxicos (Casierra-Posada y García, 2005).

En frijol, conforme se aumentan los niveles de conductividad eléctrica en un rango de 0 a 9 dS m⁻¹, con la aplicación de cloruro de sodio, la longitud de tallo, el peso fresco y el peso seco de la planta disminuyó y el diámetro del tallo se incrementó (Can *et al.*, 2018).

En trigo harinero en condiciones in vitro, callos presentan tolerancia a la salinidad, en conductividades eléctricas de 7 dS m⁻¹ aplicado en el medio de cultivo, tolerando este tipo de estrés conforme a tiempos de corto y mediano plazo, además de inhibir la permeabilidad de las membranas celulares y la concentración de ácido abscísico (Argentel *et al.*, 2017).

2.7. Efecto de las sales en la germinación de semillas

La salinidad afecta todos los aspectos del desarrollo de las plantas, incluyendo la germinación, crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo. La salinidad del suelo impone toxicidad iónica, estrés osmótico, deficiencia de nutrientes (N, Ca, K, P, Fe,

Zn) y estrés oxidativo en las plantas, por lo tanto, limita la absorción de agua del suelo (Cisneros *et al.*, 2020).

El incremento en los niveles de salinidad causa un retardo en la germinación de semillas de maíz. Además, tiende a disminuir la longitud de la raíz, la altura de las plantas, el número de hojas y el peso de la materia fresca al aumentar las concentraciones de salinidad desde 4, 6 y 8 dS m⁻¹ (Sangoquiza *et al.*, 2021).

La tasa de germinación de semillas de *C. canadensis* y *C. bonariensis* disminuyó significativamente a partir de concentraciones de 2.0 cmol·dm⁻³ de MgCl₂ y CaCl₂ (Mitsuo y Carneiro, 2011).

Por otra parte, las semillas de jitomates nativos son afectadas de manera negativa en la germinación, el vigor y el desarrollo de estructuras morfológicas de las plántulas sometidas a estrés salino, con la aplicación de cloruro de sodio de 0 - 1 % (Estrada-Trejo *et al.*, 2014).

2.8. Clorofila

La fotosíntesis es un proceso fisicoquímico por el cual las plantas fotosintéticas, utilizan la energía de la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos, este proceso conlleva a la liberación de oxígeno molecular y a la utilización de dióxido de carbono atmosférico (Carril, 2011).

Los pigmentos clorofílicos son estructuras con la capacidad de absorber las fracciones rojas y azul de la luz solar, viéndose reflejado en las intensidades de color verde que presentan las hojas y puede llegar a contener hasta 1 g de clorofila m⁻². La cantidad de clorofila también depende de la cantidad de luz disponible y de la calidad de esta (Manrique, 2003).

En centeno, el nivel de clorofila se vio afectado por las concentraciones de cloruro de sodio (60 y 100 meq), en soluciones nutritivas, ya que debilita la unión de clorofila con las proteínas cloroplásticas. Además, disminuyó el crecimiento, y en cuanto a composición mineral el contenido de SO₄ y NO₃ se redujo, mientras que el Cl y el N aumentaron (Rivera y Heras, 1973).

Por otra parte, el cultivo de frijol mostró tolerancia a condiciones moderadas de sales. Sin embargo, sometido a altas concentración de NaCl afectó el contenido de clorofila total y aumentó la resistencia estomática, por lo que disminuyó el crecimiento y la acumulación de materia vegetativa en la planta (Quintana-Blanco *et al.*, 2016).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

El presente trabajo se llevó a cabo 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) en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, 25°21'17.9" latitud N 101°02'00.32" longitud W.

3.2. Material genético

Se utilizó semilla de un híbrido comercial de maíz, adaptado al sureste de Coahuila.

3.3. Preparación de soluciones salinas

Para la preparación de las soluciones primeramente se obtuvo la conductividad eléctrica (CE) del agua destilada, mediante un conductímetro Hach Sension5, la cual fue de 3.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$, después se agregó 500 ml de agua en un vaso de precipitado y se disolvió 1 g de sal de cloruro de sodio (NaCl), enseguida se midió la conductividad eléctrica, siendo esta de 3.74 ms/cm. Posteriormente, de acuerdo a los datos obtenidos se realizaron los cálculos para estimar la cantidad de sales de NaCl necesarios para obtener las concentraciones requeridas en 500 ml de agua. Se pesaron (0.0668 g, 0.1336 g, 0.2005 g, 0.2673 g, 0.3342 g, 0.4010 g, 0.4679 g, 0.5347 g, 0.6684 g, 0.8021 g, 0.9358 g y 1.0695 g) en una balanza analítica modelo HR-200. Por último, se prepararon soluciones en concentraciones de 0 (agua destilada/testigo), 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0 CE.

3.4. Preparación de solución con NPs

Se prepararon soluciones con NPsMgO en concentración de 0 y 200 mgL^{-1} , pesando las NPsMgO en una báscula analítica y después se disolvieron en agua destilada (CE 4.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Las soluciones con NPs fueron sonicadas en un sonicator AS2060B en dos tiempos, con intervalos de diez minutos, para tener mejor homogenización.

3.5. Proceso de imbibición

Se realizó el conteo de semilla y se colocaron 100 semillas de maíz dentro de cada caja de Petri, para cada tratamiento. Posteriormente se trataron con 30 ml de solución de NPsMgO, imbibiendo las semillas por 21 horas, dentro de una cámara bioclimática a 25 °C.

3.6. Proceso de siembra

Seguidamente se prosiguió con la siembra, humedeciendo papel Anchor con las diferentes soluciones de NaCl (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.5, 3, 3.5 y 4 CE), y con la ayuda de pinzas de disección se colocaron 25 semillas con el embrión hacia abajo, por repetición, entre dos hojas de papel Anchor de forma horizontal dejando un espacio en los costados de 2 pulgadas, y en la parte superior del papel de 10 cm, se enrollaron en forma de taco y posteriormente se colocaron en bolsas de polietileno transparente, quedando 4 repeticiones por tratamiento, y estas se introdujeron dentro de contenedores de plástico, para luego ser introducidos a una cámara bioclimática marca Thermo Scientific a una temperatura de 25 °C.

3.7. Variables evaluadas en el bioensayo

3.7.1. Vigor de germinación:

Primer conteo de plántulas normales (**VIGOR**). Se realizó a los 4 días después de la siembra, esta evaluación consistió en revisar las plántulas y medir la plúmula, ya que al medir dos veces el tamaño de la semilla se tomó como plántula normal, esta variable es un indicador del vigor que posee la semilla para germinar en menor tiempo y establecerse en condiciones de campo.

Se realizó un segundo conteo al octavo día para terminar el bioensayo, donde se evaluaron las siguientes variables:

3.7.2. Germinación (GER):

Todas aquellas plántulas que presentaron un buen desarrollo de todas sus estructuras (radícula y plúmula), sin ninguna anomalía visible.

3.7.3 Plántulas de alto vigor (PAV):

Plántulas vigorosas que presentaron mayor desarrollo de sus estructuras (radícula y plúmula).

3.7.4 Plántulas de bajo vigor (PBV):

Plántulas vigorosas que presentaron menor desarrollo de sus estructuras (radícula y plúmula).

3.7.5. Plántulas anormales (PA):

Todas aquellas plántulas que carecieron de plúmula o radícula, o presentan un desarrollo irregular de alguna de sus estructuras.

3.7.6. Semillas sin germinar (SSG):

Consideradas aquellas semillas duras o muertas que no tuvieron la capacidad de germinar.

Las variables anteriores (VIGOR, GER, PAV, PBV, PA y SSG) se representaron en porcentaje (%).

3.7.7. Contenido de clorofila (CC):

Se determinó el contenido de clorofila al séptimo día, para lo cual se midieron 5 plántulas por repetición con la primera hoja bien desarrollada, con un SPAD-502 Plus para comprender el efecto en los diferentes tratamientos.

3.7.8. Longitud media de plúmula (LV) y Longitud media de radícula (LR):

Se tomaron medidas de las plúmulas y radículas de todas las plántulas normales por repetición, y los datos obtenidos fueron expresados en cm.

3.7.9. Peso seco de plúmula (PSP) y de radícula (PSR):

Esta variable se obtuvo una vez terminadas todas las anteriores. Consistió en dividir las plántulas en plúmula y radícula, posteriormente se colocaron en bolsas de papel estraza por repetición, para someterlas a secado en una estufa marca Riosa H-24, con una duración de 24 h a 72 °C. Pasadas las 24 horas se extrajeron, y se colocaron en un desecador, para posteriormente ser pesadas en una balanza analítica marca AND HR-200, el resultado fue expresado en (mg/plántula).

Además, se determinó la relación peso seco de radícula/peso seco de plúmula (PSR/PSP). Y un índice de vigor (IVI = germinación % x (PSP mg + PSR mg)).

3.8 Análisis estadístico

El estudio se estableció en un diseño completamente al azar, con arreglo factorial (2 x 13), siendo dos los factores en estudio: 1. Concentración de NPsZnO (0, 200 mgL⁻¹) y 2. Conductividad eléctrica (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.50, 3.0, 3.50, 4.0 mS/cm). Las variables evaluadas fueron analizadas para determinar diferencias estadísticas para las variables en estudio, también se realizó una comparación de medias con la Prueba de Tukey (P≤0.05), utilizando el paquete estadístico SAS (2004).

Modelo estadístico:

$$T_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

T_{ijk} = Valor observado en la variable de respuesta;

μ = Media general;

α_i = efecto del i-ésimo ambiente salino (NaCl);

β_j = efecto de la j-ésima concentración de NPSZnO;

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Interacción del i-ésimo ambiente salino y la j-ésima concentración de NPSZnO;

ε_{ijk} = Error experimental.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 1), en las variables fisiológicas vigor de germinación, plántulas de alto vigor y plántulas de bajo vigor, muestran diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), en las fuentes de variación conductividad eléctrica, concentración de nanopartículas y la interacción conductividad eléctrica x concentraciones de nanopartículas. Sin embargo, en la fuente de variación conductividad eléctrica, la variable plántulas anormales mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$), y en las fuentes de variación conductividad eléctrica y concentraciones de nanopartículas, las variables porcentaje de germinación y semillas sin germinar no presentaron diferencias estadísticas.

Por otra parte, las variables porcentaje de germinación y semillas sin germinar mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), en la fuente de variación interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas.

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 2), para las variables peso seco de plúmula, peso seco de radícula, peso seco de radícula/peso seco de plúmula, e índice de vigor, en las fuentes de variación conductividad eléctrica, concentración de nanopartículas y la interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas, presentaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), a excepción del peso seco de radícula/peso seco de plúmula, en la fuente de variación concentración de nanopartículas, debido a que no presentó diferencias estadísticas.

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro 3), se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), para longitud de plúmula, longitud de radícula, PSR/PSP, y contenido de clorofila, en las fuentes de variación conductividad eléctrica, concentraciones de nanopartículas e interacción conductividad eléctrica por concentración de nanopartículas.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables fisiológicas de plántulas de maíz evaluadas en el laboratorio con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).

FV	GL	VIGOR (%)	GERM (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)
C.E	12	1205.82 **	49.08 NS	964.17 **	678.28 **	42.87 *	17.12 NS
NPS	1	1722.46 **	104.00 NS	4984.61 **	3648.61 **	67.84 NS	3.84 NS
C.E * NPS	12	1512.12 **	82.33 *	910.94 **	654.28 **	37.17 NS	31.84 *
ERROR	78	89.74	34.46	121.23	120.00	22.41	13.58
CV (%)		12.89	6.40	14.35	73.40	82.60	138.90

** = Altamente significativo ($P \leq 0.01$); * = Significativo ($P \leq 0.05$); NS = No significativo; FV = Fuente de variación; GL = grados de libertad; Vigor = plántulas normales al primer conteo; Germinación = plántulas normales al segundo conteo; PAV = plántulas alto vigor; PBV = plántulas de bajo vigor; PA = plántulas anormales; SSG = semillas sin germinar; C. E = conductividad eléctrica; NPS = concentración de nanopartículas; C.E * NPS = Interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas; ERROR = error experimental; CV = coeficiente de variación.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para contenido de biomasa en plántulas de maíz evaluadas en el laboratorio con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).

FV	GL	PSP (mg)	PSR (mg)	PSR/PSP	IVI (mg)
C.E	12	35.16 **	35.79 **	0.036 **	42895.98 **
NPS	1	462.62 **	221.82 **	0.003 NS	998149.71 **
C.E * NPS	12	55.55 **	53.56 **	0.063 **	65649.77 **
ERROR	78	5.38	3.25	0.002	13209.07
CV (%)		5.37	6.93	8.422	7.24

** = Altamente significativo ($P \leq 0.01$); * = Significativo ($P \leq 0.05$); NS= No significativo; FV= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; PSP= peso seco de pluma; PSR= peso seco de radícula; PSR/PSP= peso seco de radícula/ peso seco de pluma; IVI=Índice de vigor; C. E= Conductividad eléctrica; NPS = Concentración de nanopartículas; C.E * NPS= Interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas; ERROR= Error experimental; CV= coeficiente de variación.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para variables evaluadas en plántulas con la aplicación de (NPsMgO), en ambientes salinos (NaCl).

FV	GL	LP (cm)	LR (cm)	LP/LR (cm)	GL	COLOROFILA (SPAD)
C.E	12	177.04 **	184.90 **	0.62 **	11	165.62 **
NPS	1	444.72 **	2651.70 **	0.83 **	1	680.15 **
C.E*NPs	12	167.39 **	271.62 **	0.19 **	11	90.12 **
ERROR	2356	4.27	7.81	0.03	472	8.39
CV		13.30	14.42	21.11		15.53

** = Altamente significativo ($P \leq 0.01$); * = Significativo ($P \leq 0.05$); NS= No significativo; FV= Fuente de variación; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; LP/LR= Longitud de plúmula/ Longitud de radícula; CLOROFILA= Contenido de clorofila; C. E= Conductividad eléctrica; NPS= Concentración de nanopartículas; C.E * NPS= Interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas; ERROR= error experimental; CV= coeficiente de variación.

La comparación de medias por CE se presenta en el Cuadro 4, en la variable vigor de germinación se observó que ambientes salinos en un rango de 0.25-0.50 mS/cm, mejoraron el porcentaje, con 89 y 90 %, respectivamente. Sin embargo, al estar expuesta a concentraciones en un rango de 2.50 a 4.00 mS/cm de NaCl, se presentaron valores de 59% y 64%, respectivamente. Por otra parte, el tratamiento testigo (0 mS/cm) presentó 71%, esto indica que hubo una reducción significativa al incrementar los valores de la CE.

Para la variable porcentaje de germinación no se observaron diferencias estadísticas, pero sí numéricas, en donde a una concentración de 0.50 mS/cm de NaCl, mostró el valor más alto con 96%. Sin embargo, al aumentar la concentración a 3.50 mS/cm, presentó un valor de 88%, esto es, hubo una reducción del 8 %.

En la variable plántulas de alto vigor se observaron diferencias estadísticas, con respecto al tratamiento control (0.0 mS/cm) que presentó un valor de 73%, al aumentar las concentraciones de 2.50 a 4.00 mS/cm de NaCl, se obtuvieron valores de 59 y 61%, respectivamente. Así mismo, al aumentar la concentración salina, el porcentaje de plántulas de bajo vigor también se incrementó, exhibiendo valores de 27 y 30%.

Meza *et al.* (2007) indican que al aplicar concentraciones mayores a 4.5 dS m⁻¹ de NaCl, se presenta un efecto negativo tanto en la tasa de germinación, como en la germinación total, en semillas de parchita (*Passiflora edulis f. flavicarpa*).

Sangoquíza *et al.* (2021) mencionan que al aplicar concentraciones menores de 2 dS m⁻¹ no se observaron efectos negativos en la germinación en semillas de maíz, por otro lado, al aumentar las concentraciones de 4 y 6 dS m⁻¹ de NaCl, afecta la germinación debido a un incremento de sales en el medio de desarrollo, atribuido a un estrés osmótico que impidió la imbibición de semillas.

Según Meza *et al.* (2004), al aplicar concentraciones de 8.5 dS/cm de NaCl, afecta la germinación, disminuye la longitud de radícula y la longitud de los cotiledones en semillas de níspero (*Manilkara achras* Miller Fosberg), debido a que, al incrementar

las sales, estas producen desbalance hídrico y agotamiento de energía requerida en el metabolismo involucrado en el crecimiento.

Can *et al.* (2014) indican que a concentraciones 6.3 y 9 dS m⁻¹ de NaCl, se disminuyó la biomasa de la raíz de *Phaseolus vulgaris* L., debido a un potencial osmótico más negativo de la solución del suelo, que impidió la extracción del agua, repercutiendo en una menor elongación celular.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el bioensayo y con respecto a trabajos relacionados con el tema, muestran que, al aplicar altas concentraciones de NaCl, presenta efectos negativos en variables como porcentaje de germinación, longitud de radícula y plúmula debido a un déficit hídrico y toxicidad de iones específicos Can-Chulim *et al.* (2017).

Al realizar la comparación de medias por concentración (Cuadro 5), en la variable peso seco de plúmula se encontró una mayor acumulación de biomasa seca al aplicar 2 mS/cm NaCl, obteniendo 46.42 mg/plántula, siendo este el valor más alto, seguido del tratamiento control 0.0 mS/cm con 39.64 mg/plántula. En la variable peso seco de radícula se observó que el tratamiento control (0.0 mS/cm) obtuvo una acumulación de materia orgánica (29.04 mg/plántula), y a 1.25 mS/cm presentó 22.64 mg/plántula, sin embargo, a una concentración de 4 mS/cm obtuvo 29.29 mg/plántula superando al testigo.

La variable relación peso seco de radícula/peso seco de plúmula presentó diferencias estadísticas. Por otro lado, al aplicar concentraciones de 0.0 y 4 ms/cm, presentaron una acumulación de materia seca 0.73 y 0.72 mg/plántula, respectivamente. Sin embargo, al aplicar concentraciones moderadamente bajas de 1.25 mS/cm NaCl se obtuvo como resultado 0.51 mg/plántula. Esta respuesta se puede relacionar con lo reportado por Casierra-Posada y García (2005), quienes indican efectos negativos en el desarrollo del área foliar de plantas de fresa, al incrementar los niveles de NaCl, sin embargo, hay un incremento relativo en el peso seco de radícula ya que las raíces tendieron a crecer para reducir la concentración de iones tóxicos en sus tejidos y encontrar un área donde las concentraciones de materiales tóxicos sean menores.

Sánchez-Bernal *et al.* (2020) al trabajar con dos variedades de zacate forrajero, observaron una disminución del peso de plúmula y de radícula, al aplicar 6 dS m⁻¹ de NaCl, mediante la reducción de la expansión foliar, altura, grosor de tallo y longitud de raíz, que afectó en forma adversa la biomasa acumulada conforme se incrementó la concentración. Esto resultó debido al efecto de los factores osmótico, toxico-iónico y al desbalance nutricional limitando el crecimiento de los órganos.

En el estudio de Martínez *et al.* (2012), reportaron que la aplicación de NaCl a semillas de maíz presenta una disminución de biomasa seca (aérea y radicular) a una concentración de 100 mM, afectando los procesos fisiológicos debido a alteraciones en las relaciones hídricas, y a un desbalance nutricional que afectó de forma directa o indirecta.

Por otro lado, en tres cultivares de maíz alcanzaron mayor contenido de biomasa seca en concentraciones de 0 y 25 mM de NaCl, además cabe mencionar que no presentaron síntomas de toxicidad. Sin embargo, a concentraciones de 50, 75 y 100 mM el crecimiento se redujo significativamente, indicando síntomas de toxicidad salina (Natera *et al.*, 2011).

En cuanto a la comparación de medias por tratamiento con NPsMgO (Cuadro 6), para la variable vigor de germinación, se observaron diferencias estadísticas al aplicar 200 ppm de NPsMgO, con un valor de 63% en comparación con el tratamiento control (0 ppm) que obtuvo 84%, observando que las NPs inhibieron la expresión de esta variable.

En las variables por ciento de germinación, plántulas anormales y semillas sin germinar, no presentaron diferencias significativas ya que se posicionan dentro del mismo grupo estadístico.

Para la variable plántulas de alto vigor, al ser sometidas a 200 ppm de NPsMgO, presentó 70% con respecto al tratamiento control que obtuvo 84%. Sin embargo, el porcentaje de plántulas de bajo vigor aumenta en un 21% al aplicar NPs. Se observó que las NPsMgO redujeron el vigor de las plántulas.

Para las variables peso seco de plúmula, peso seco de radícula, relación del peso seco de radícula/peso seco de pluma, e índice de vigor presentaron una disminución al aplicar 200 ppm de NPs, a diferencia del tratamiento testigo que presentó mayor contenido de biomasa. Las propiedades de las NPs tales como el área de la superficie, composición química, tamaño, forma y carga, tienen una influencia importante en sus propiedades fitotóxicas.

Estudios realizados por García *et al.* (2011), indican que las NPs de óxido de cerio son tóxicas de acuerdo con resultados obtenidos en semillas, mostraron un efecto perjudicial en bioensayos de germinación. La fitotoxicidad causada por algunas NPs resulta en un comportamiento impredecible e irregular sobre el estrés oxidativo, que a su vez depende del tipo, concentración, propiedades y medios de exposición de las NPs (Foltete *et al.*, 2011).

Sin embargo, en algunos estudios, se han reportado resultados satisfactorios con el uso y aplicación de NPs, tal es el caso de Estrada y Méndez (2016), quienes indican que al recubrir semillas de maíz con AgNPs, presentó mayor vigor de germinación y diámetro de tallo, que es una de las características de suma relevancia ya que una planta de tallo delgado tiene más posibilidad de sufrir acame. Asimismo, Méndez-Argüello *et al.* (2016) mencionan que al aplicar NPsZnO + Ag 2.5%, en plantas de *Capsicum annuum* presentaron mayor crecimiento y producción de biomasa, atribuyendo a la actividad del zinc como precursor de la producción de auxinas que promueven la división y elongación celular. Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021) en un estudio observaron un incremento en el rendimiento mediante el desarrollo y calidad de fruto en melón, a concentraciones de 200 mgL⁻¹ de NPsZnO, atribuido a que la aplicación de estas NPs es una buena alternativa para mejorar el rendimiento y contenido nutracéutico.

Cuadro 4. Medias por conductividades eléctricas para variables fisiológicas evaluadas en semillas y plántulas de maíz en el laboratorio.

C.E	VIGOR (%)	GER (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)
0.00	71 b-e	90 a	73 b-d	17 abc	5 a	5 a
0.25	89 a	95 a	91 a	4 c	3 a	2 a
0.50	90 a	96 a	89 ab	7 c	2 a	2 a
0.75	55 e	92 a	80 abc	12 abc	4 a	4 a
1.00	78 a-d	90 a	71 bcd	19 abc	8 a	2 a
1.25	58 e	91 a	74 abc	17 abc	5 a	4 a
1.50	86 ab	94 a	86 ab	8 c	5 a	1 a
1.75	84 abc	94 a	89 ab	5 c	4 a	2 a
2.00	81 abc	91 a	81 ab	10 bc	8 a	1 a
2.50	64 de	89 a	62 cd	27 ab	9 a	2 a
3.00	75 a-d	88 a	79 abc	9 bc	8 a	4 a
3.50	59 e	88 a	59 d	29 a	9 a	3 a
4.00	68 cd	91 a	61 cd	30 a	6 a	3 a
MEDIA	73	92	77	15	6	3
TUKEY(P≤0.05)	16.18	10.03	18.81	18.71	8.08	6.29

Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; C.E.= Conductividad eléctrica; Vigor =Plántulas normales al primer conteo; Germinación= Plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas de alto vigor; PBV= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar.

Cuadro 5. Medias por conductividad eléctrica para la evaluación del contenido de materia seca acumulada en plántulas.

C.E	PSP (mg)	PSR (mg)	PSP/PSR	IVI (mg)	COLOROFILA (SPAD)
0.00	39.64 e	29.04 a	0.73 a	1543.30 abc	21.69 a
0.25	42.36 b-e	24.18 de	0.58 bcd	1571.76 abc	19.57 abc
0.50	43.94 a-d	26.65 a-d	0.60 bc	1695.71 a	18.07 cde
0.75	42.20 b-e	27.72 ab	0.66 ab	1602.23 abc	17.06 ef
1.00	44.09 abc	25.02 b-e	0.56 cd	1564.20 abc	15.65 f
1.25	44.57 abc	22.64 e	0.51 d	1527.90 abc	16.57 ef
1.50	45.49 ab	25.02 b-e	0.55 cd	1666.13 ab	21.04 a
1.75	43.97 abc	27.47 abc	0.62 bc	1677.16 ab	20.86 ab
2.00	46.42 a	23.86 de	0.51 d	1601.36 abc	17.62 c-f
2.50	42.04 b-e	24.46 cde	0.60 bc	1497.34 bc	15.62 f
3.00	45.22 abc	27.79 ab	0.61 bc	1614.28 abc	18.79 bcd
3.50	39.99 de	24.83 cde	0.61 bc	1439.00 c	20.86 ab
4.00	41.41 cde	29.29 a	0.72 a	1616.51 abc	17.41 def
MEDIA	43.18	26.00	0.60	1585.91	18.65
TUKEY	3.96	3.08	0.08	196.39	2.14

(P≤0.05)

Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; C.E = Conductividad eléctrica; PSP= Peso seco de pluma; PSR= Peso seco de radícula; PSR/PSP= Peso seco de radícula/ peso seco de plúmula; IVI= Índice de vigor.

Cuadro 6. Comparación de medias de los tratamientos por concentración de NPs, en las variables fisiológicas evaluadas en semilla de maíz en el laboratorio.

NPS (ppm)	VIGOR (%)	GER (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)	PSP (mg)	PSR (mg)	PSP/PSR	IVI (mg)
0	84 a	93 a	84 a	9 b	5 a	2 a	45.29 a	27.46 a	0.61 a	1683.88 a
200	63 b	91 a	70 b	21 a	6 a	3 a	41.07 b	24.54 b	0.60 a	1487.95 b
MEDIA	73	92	77	15	6	3	43.18	26.00	0.60	1585.91
TUKEY	3.69	2.29	4.29	4.27	1.84	1.43	0.90	0.70	0.02	44.87

Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; NPS= Concentración de nanopartículas; Vigor = Plántulas normales al primer conteo; Germinación = Plántulas normales al segundo conteo; PAV = Plántulas de alto vigor; PBV = Plántulas de bajo vigor; PA = Plántulas anormales; SSG = Semillas sin germinar; PSP= Peso seco de pluma; PSR= Peso seco de radícula; PSP/PSR= Peso seco de radícula/peso seco de pluma; IVI= Índice de vigor.

Cuadro 7. Comparación de medias de los tratamientos por concentración de NPs, para la variable contenido de clorofila en plántulas de maíz evaluadas en el laboratorio.

NPS (ppm)	CLOROFILA (SPAD)
0	19.82 a
200	17.47 b
Media	18.65
TUKEY	0.51

Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales; NPS= Concentración de nanopartículas; CLOROFILA= Contenido de clorofila.

El contenido de clorofila (Cuadro 5) tendió a reducirse al incrementar la C.E., siendo el valor más alto el del testigo con 21.69 unidades SPAD. En cuanto a la respuesta al aplicar 200 ppm de NPsMgO, se observó una reducción de 2 unidades, con respecto al testigo, de 19.82 (Testigo) a 17.47 (200 ppm) Unidades SPAD.

Lira-Saldívar *et al.* (2016) mostraron que al aplicar concentraciones de NPs idóneas, en cultivos agrícolas, se obtiene mejores resultados, sin embargo, concentraciones altas pueden repercutir, generando daños múltiples como es en la germinación, tamaño de plántulas, biomasa, alteraciones en el metabolismo y acumulación de nutrientes en los tejidos. Por otro lado, se ha reportado que la interacción NPs x plantas puede ejercer toxicidad indirecta, afectando el crecimiento y desarrollo de plantas, y en algunos casos generar deficiencia de nutrientes. Las NPs por su tamaño pueden causar acumulación y fitotoxicidad e inducir daños al nivel celular y molecular (Lira-Saldívar *et al.*, 2016).

Los valores medios tomando en cuenta la interacción de la CE y de las NPsMgO, se presentan en los Anexos (1-6), se observó que en las variables VIGOR, GER, PAV, PSP, PSR, PSR/PSP, IVI y Clorofila se presentó modulación por parte de los tratamientos con NPsMgO en la respuesta a los ambientes salinos.

De acuerdo al Anexo 1, al tratar la semilla de maíz con 200 ppm de NPsMgO, se obtiene mayor vigor de germinación al ser expuestas a 0.25 CE de NaCl. Sin embargo, al incrementar la conductividad eléctrica a 0.75 y tratar la semilla con 200 ppm de NPsMgO, se observó un efecto positivo en el porcentaje de germinación (Anexo 2).

En el Anexo 3 se muestra que a una conductividad eléctrica de 1.75 de NaCl, tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO, se obtiene mejor desarrollo de plántulas, generando plántulas de alto vigor. Por otro lado, al incrementar la conductividad eléctrica a 2.50 de NaCl, disminuye el desarrollo de plántulas, obteniendo mayor número de plántulas de bajo vigor (Anexo 4).

En el Anexo 5, en la interacción NPsMgO x NaCl a una concentración de 3 CE de NaCl, tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO, generó mayor contenido de biomasa seca de plúmula con respecto al testigo. Por otro lado, la variable biomasa seca de radícula mostró mayor peso con una concentración de 0.75 CE de NaCl, y tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO (Anexo 6).

En la variable peso seco de radícula/peso seco de plúmula (Anexo 7), se obtuvo mayor contenido de biomasa, a una concentración de 0.75 CE de NaCl, tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO. Para la variable índice de vigor, se obtuvo mejor desarrollo y contenido de biomasa seca de plántula en 1.75 CE de NaCl, tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO (Anexo 8).

En la interacción NPsMgO x NaCl para el contenido de clorofila (Anexo 9), presentó un efecto modulador, generando mayor contenido de clorofila tratando la semilla con 200 ppm de NPsMgO, en una conductividad eléctrica de 1.50 de NaCl.

V. CONCLUSIONES

Los niveles de CE originaron diferencias en las respuestas a los ambientes salinos, en las variables relacionadas con el vigor de las plántulas y el contenido de clorofila.

Germinar semillas en ambientes con CE en un rango de 0.25 a 0.75 mS/cm, mejoró la expresión del vigor, incrementando el porcentaje de plántulas de alto vigor, así como la acumulación temprana de materia seca de plúmula. El contenido de clorofila se redujo al incrementar la CE.

Imbibir semillas de maíz en 200 ppm de NPsMgO, redujo la capacidad germinativa, el desarrollo de plántulas y el contenido de clorofila.

En la Interacción NPsMgO x NaCl se moduló la expresión de las variables fisiológicas relacionadas con el vigor, la germinación, y el peso seco de plúmula y de radícula, además en la relación peso seco de radícula/peso seco de plúmula, y el índice de vigor.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Argentel, M. I., Fonseca, R. I., Garatuza, P. J., Yépez G. E., y González A. J. 2017. Efecto de la salinidad en callos de variedades de trigo durante el cultivo in vitro. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3):477-488.
- Can, C, Á., Ramírez, G. L., Ortega, E, G., Cruz, C. H. M., Flores, R. E., Sánchez, B. D., y Madueño, M. A. 2014. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 5(5):753-763.
- Can, C. Á., Ramírez, G. L. G., Ortega, E. H. M., Crespo, C. E., Flores, R. D., Sánchez, B. E. I., y Madueño, M. A. 2018. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 5(5):753-63.
- Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I, Madueño-Molina, A., Bojórquez-Serrano, J. I., y Mancilla-Villa, Ó. R. 2017. Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la salinidad generada por NaCl, Na₂SO₄ y NaHCO₃. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 8(6):1287-1300.
- Cárcamo, H., Bustos, R., Fernández, F., y Bastias, E. 2009. Efecto del estrés salino en la anatomía foliar y radical del maíz lluteño (*Zea mays*) tratado con un mitigante de salinidad. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/37257> (Consultado: 13 diciembre 2021).
- Carril, E. P. U. 2011. Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*. 2(3): 1-47.
- Casierra-Posada, F., y García, N. 2005. Crecimiento y distribución de materia seca en cultivares de fresa (*Fragaria sp.*) bajo estrés salino. *Agronomía colombiana*. 23(1): 83-89.
- Cisneros, A. R., Guadiana-Alvarado, Z. A., Erich-Dietmar, R. K., Rueda, P. E. O., Rodríguez, C. C., y Durán, G. H. M. 2020. Efecto de salinidad sulfática en quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). *Agroproductividad*.13(5): 51-58.

CONABIO. 2020. México como centro mundial. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.1-5.

Estrada, U.J., y Méndez, A. A. 2016. Efecto de nanopartículas de plata (AgNPs) sobre la calidad fisiológica de la semilla de maíz (*Zea mays* L.). Tlamati. 7(3):1-12.

Estrada-Trejo, V., Lobato-Ortiz, R., García-de los Santos, G., Carrillo-Castañeda, G., Castillo-González, F., Contreras-Magaña, E., Ayala-Garay, O. J., De la O - Olan, M., y Artola M. A. 2014. Diversidad de poblaciones nativas de jitomate para germinación en condiciones salinas. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 5(6):1067-1079.

Faria, F., Hashim, A., and Anees, S. 2021. Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production. Environ sci pollut res. 28(2):1292-1303.

Foltête, A.S., Masfaraud, J.F., Bigorgne, E., Nahmani, J., Chaurand, P., Botta, C. y Cotelle, S. 2011. Environmental impact of sunscreen nanomaterials: ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO₂ nanocomposites on *Vicia faba*. Environmental Pollution, 159(10), 2515-2522.

García, A., Espinosa, R., Delgado, L., Casals, E., González, E., Puentes, V. y Sánchez, A. 2011. Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. Desalination, 269(1), 136-141.

Gómez, G. M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. Repertorio de medicina y cirugía, 27(2):75-80.

González-Moscoso, M., Martínez-Villegas N.V., Meza-Figueroa, D., Rivera-Cruz, M.C., Cadenas-Pliego G., and Juárez-Maldonado, A. 2021. SiO₂ nanoparticles improve nutrient uptake in tomato plants developed in the presence of arsenic. Bio ciencias. 8:1084.

Lamz, P. A., y González, C. M. C. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. Cultivos tropicales. 34(4):31-42.

Lira-Saldívar, R. H., Canul-Tun, C., Méndez-Argüello, B., de los Santos-Villarreal, G. 2016. Efecto de nanopartículas en aspectos fisiológicos, bioquímicos y moleculares de plantas. *Agronotecnología*. 93-108.

Lira-Saldívar, R.H., Méndez-Argüello B., y Vera-Reyes, I. 2016. Producción de especies reactivas de oxígeno en plantas elicidadas con nanopartículas. *Agronotecnología*. 80-89.

Lugo-Medina, E., García-Gutiérrez, C., y Ruelas-Ayala, R, D. 2010. Nanotecnología y nanoencapsulación de plaguicidas. *Ra ximhai*. 6(1):63-67.

Manrique, E. 2003. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz. *Ecosistemas*. 12(1):1-11.

Martínez, D., Huelva, R., Portuondo, L., y Guridis, F. 2012. Evaluación del efecto protector de las sustancias húmicas líquidas en plantas de maíz cultivar p-2928 en condiciones de salinidad. *Centro agrícola*. 39(1):29-32.

Méndez, N. J. R., Ibarra, P. F.T., y Merazo, P. J.F. 2011. Germinación y desarrollo de plántulas de tres híbridos de maíz (*Zea mays* L.) bajo soluciones osmóticas. *Revista facultad de agronomía*. 28(1):408-420.

Méndez, N. K.C., Caicedo, P.M.L., Bedoya, C. S.M., Ríos, M. A., Zuluaga, G. R., y Giraldo Ramírez D.P. 2014. Tendencias investigativas de la nanotecnología en empaques y envases para alimentos. *Lasallista de investigación*. 11(2):18-28.

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

Mendoza, U. G., y Rodríguez-López, J. L. 2006. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*. 29:162-163.

Meza, N., Arizaleta, M., y Bautista, D. 2007. Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de semillas de parchita (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). *Revista de la facultad de agronomía*. 24(1):69-80.

Meza, N., Pereira, A., y Bautista, D. 2004. Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de semillas de níspero (*Manilkara achras* Miller Fosberg). Revista de la facultad de agronomía. 21(1):60-66.

Miguel-Rojas, C., y Pérez, L. A. 2020. Nanotecnología: buscando agroquímicos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Consejería de agricultura, ganadería, pesca y desarrollo sostenible. Instituto de investigación y formación agraria y pesquera.1-10.

Mitsuo, Y. O., y Carneiro, G.S. 2011. Efecto del estrés salino sobre la germinación de las semillas de *Conyza canadensis* y *Conyza bonariensis*. Bioagro. 23(3):169-174.

Mukhopadhyay, S. 2014. Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints, nanotechnology. Science and applications. 7:63–71.

Quintana-Blanco, W. A., Pinzón-Sandoval, E.H., y Fernando, T. D. 2016. Evaluación del crecimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) CV ICA cerinza, bajo estrés salino. Actualidad y divulgación científica. 19(1):87 - 95.

Ramírez, R. S. C., Ortega, O. H., Fortis, H. M., Nava, S. J. M., Orozco, V. J. A., y Preciado, R.P. 2021. Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 12(4):579–589.

Rivera, A., y Heras, C. L. 1973. Efecto de distintos niveles de salinidad sobre el contenido de clorofila, composición mineral y crecimiento en centeno (*Secale cereales*) tetraploide. Estación experimental de aula dei. 12:100-108.

Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., y Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 12(5):291-299.

Ruiz, T. N. A., García, L. J.I., Lira, S. R.H., Vera, R. I., y Méndez, A. B. 2016. Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas.

agronanotecnología nueva frontera de la revolución verde. Saltillo, Coah, UAAAN. 42-60.

Sánchez, B. E. I., Ortega, E. M., González, H. V., Camacho, E. M., y Kohashi, S. J. 2008. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, inducido por diversas soluciones salinas. *Interciencia*. 33(9):647-650.

Sánchez-Bernal, E. I., Santos-Jerónimo, S., Ortega-Escobar, H. M., López-Garrido S. J., y Camacho-Escobar, M. A. 2020. Crecimiento de los pastos cayman y cobra en diferentes niveles salinos de NaCl, en invernadero. *Terra latinoamericana*. 38(2): 391-401.

Sangoquiza, C. C. A., Viera T. Y., Yáñez G. C. F., y Zambrano M. J. L. 2021. Efecto del estrés salino sobre el crecimiento de plántulas de maíz variedad "Tayuyo" en condiciones in vitro. *Centro agrícola*. 48(2):14-23.

Shrivastava, P., and Kumar, R. 2015. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi journal of biological sciences*. 22:123-131.

Soriano-Melgar, L. A. A., López-Guerrero, A. G., Cortéz-Mazatan, G., Mendoza-Mendoza, E., y Peralta-Rodríguez, R. D. 2018. Nanopartículas de óxido de zinc y óxido de zinc/grafeno empleadas en soluciones florero durante la vida poscosecha de lisianthus (*Eustoma grandiflorum*). *Agroproductividad*. 11:137-144.

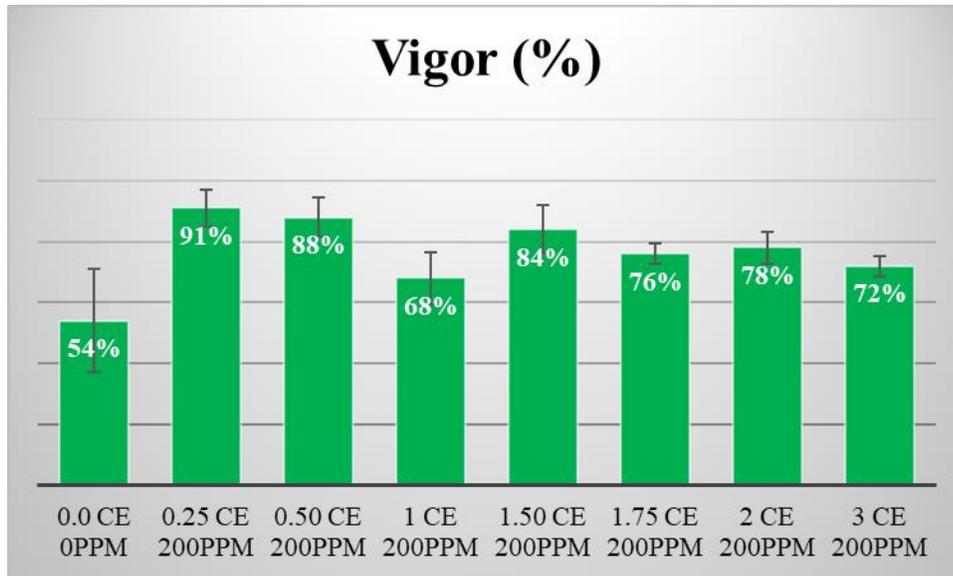
Treviño, L. E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides M. A., Ortega, O.H., Cadenas, P. G., y Cabrera-de la Fuente, M. 2021. Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 26:159-167.

Velázquez-Ventura, J.C., Rincón-Sánchez, F., Ruíz-Torres. N.A., y Martínez-Reyna, J.M. 2020. Respuesta al estrés por salinidad de familias s1 de dos poblaciones de maíz. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 7(1):2355.

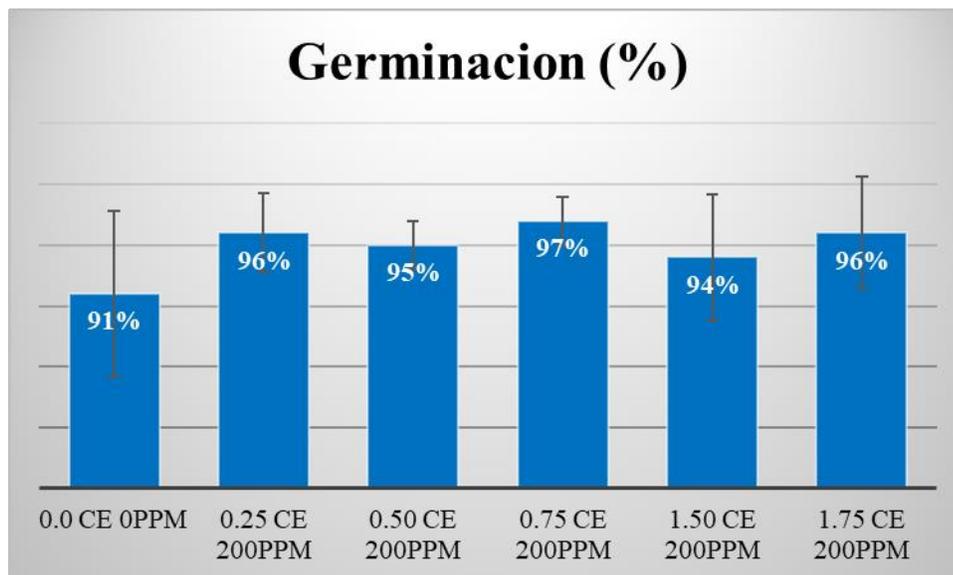
Visconti, F., y De-Paz, J. M. 2018. Cómo conocer la salinidad del suelo mediante medidas de conductividad eléctrica. *Levante agrícola*. 441:98-103.

VII. ANEXOS

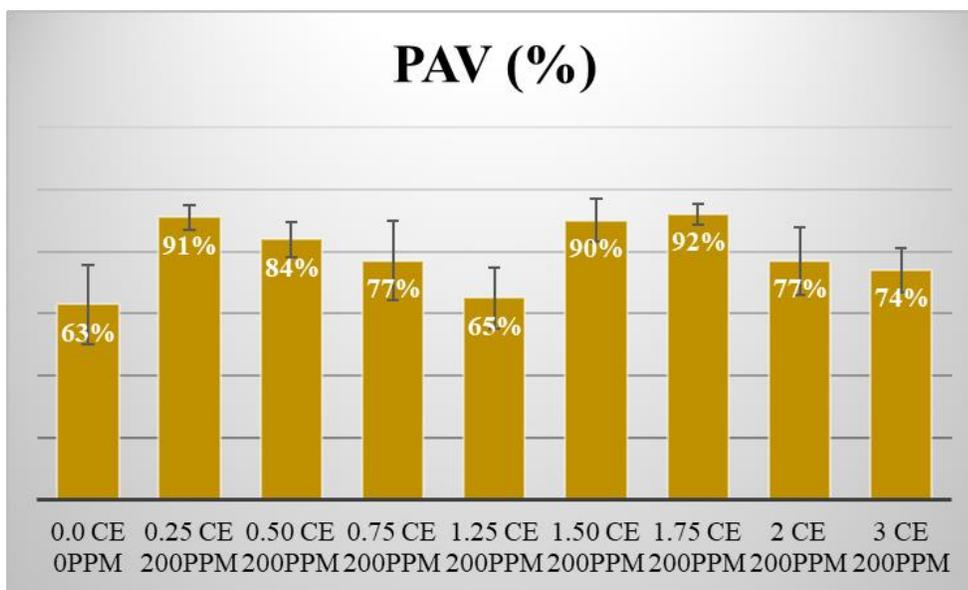
Anexo 1. Interacción NPsMgO x NaCl en la variable vigor de germinación.



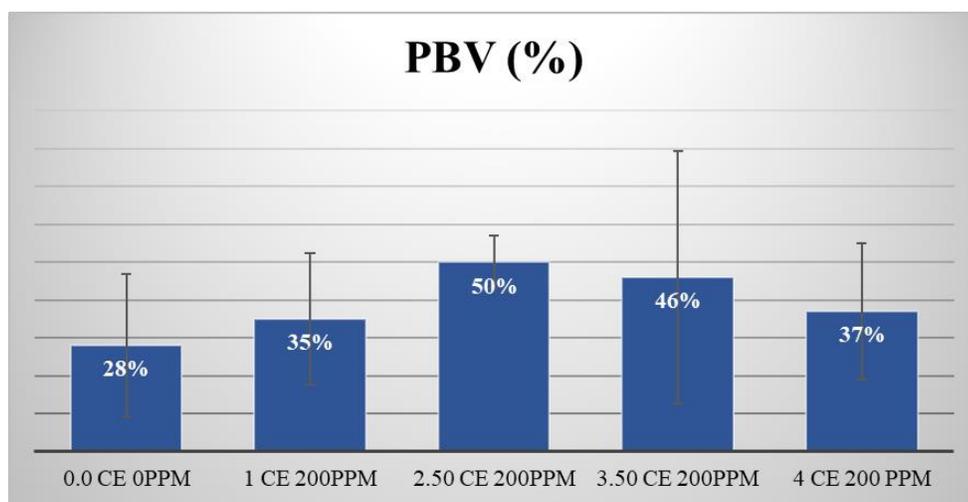
Anexo 2. Interacción NPsMgO x NaCl en la variable germinación.



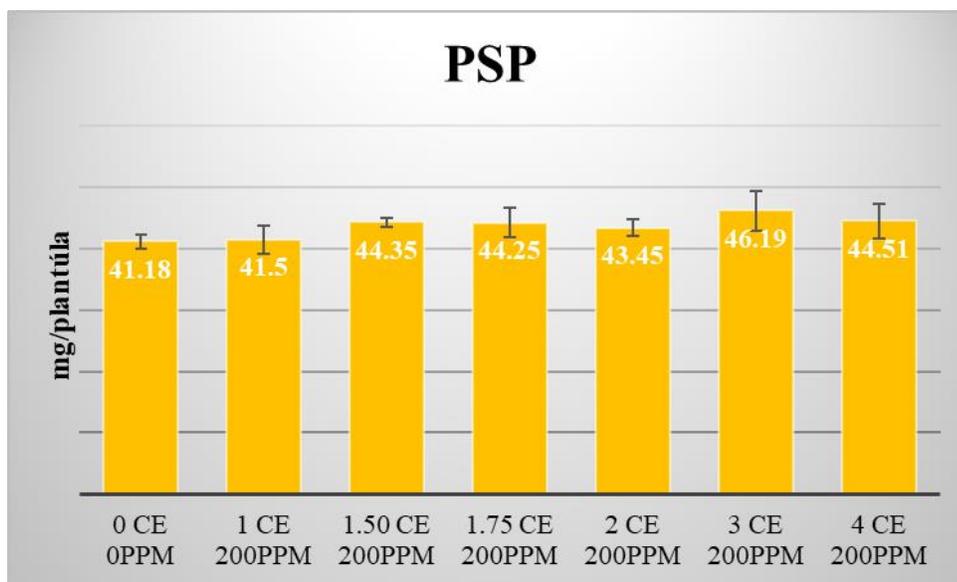
Anexo 3. Efecto de las NPsMgO en la variable plántulas de alto vigor, expuestas a ambientes salinos.



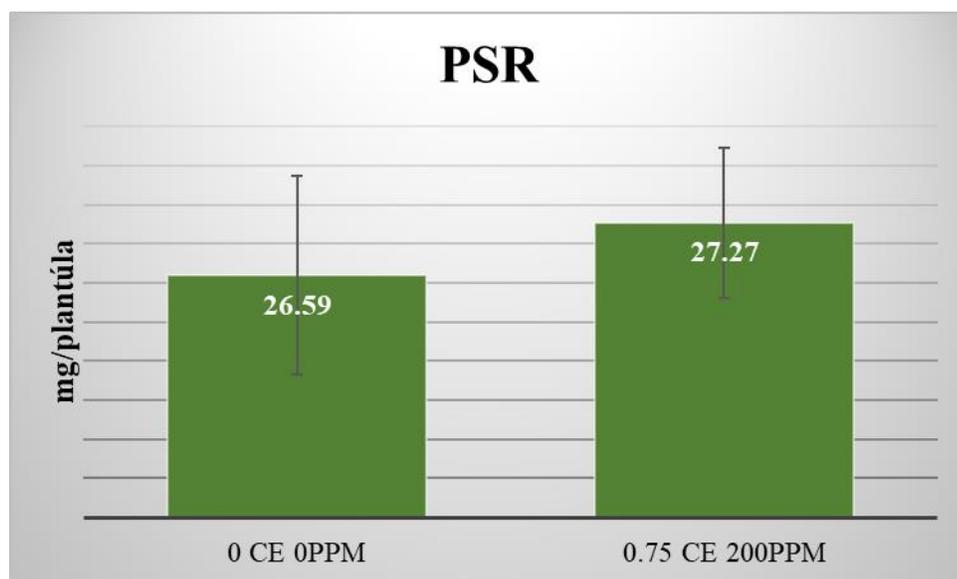
Anexo 4. Efecto de las NPsMgO en la variable plántulas de bajo vigor expuestas a ambientes salinos.



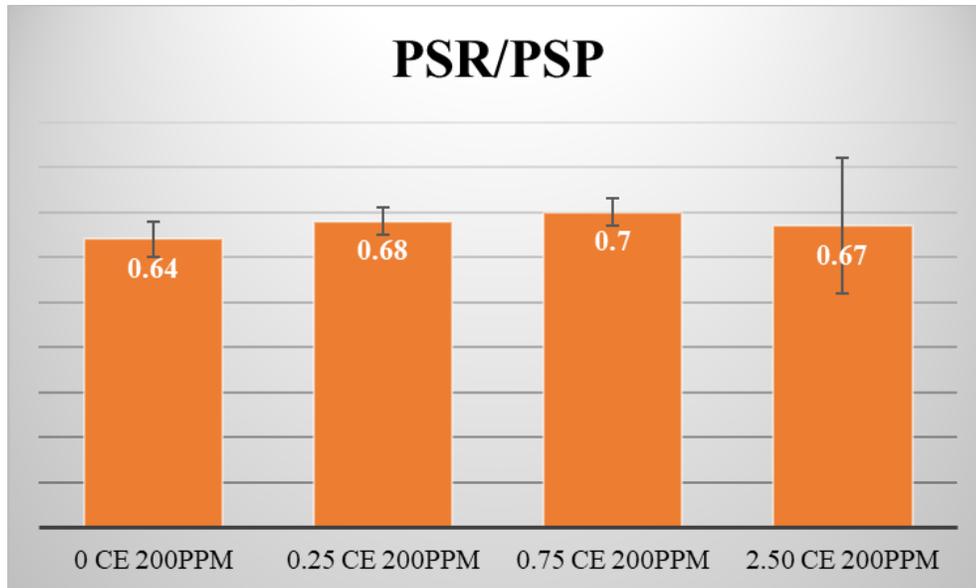
Anexo 5. Interacción NPsMgO x NaCl en la acumulación de materia seca de plúmula.



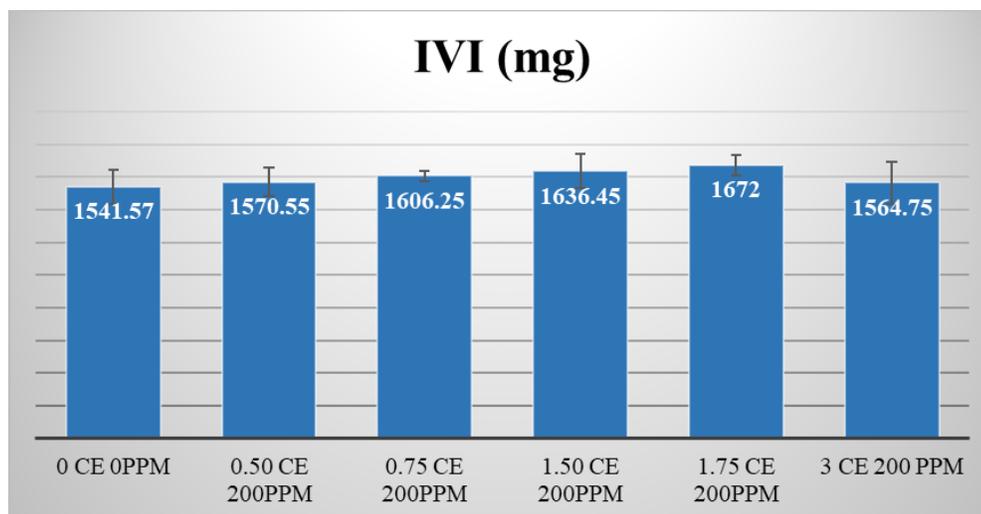
Anexo 6. Interacción NPsMgO x NaCl en la acumulación de materia seca de radícula.



Anexo 7. Efecto de las NPsMgO aplicadas a semillas de maíz y desarrolladas en diferentes ambientes de NaCl, en la relación peso seco de plúmula/peso seco de radícula.



Anexo 8. Efecto de la interacción NPsMgO x NaCl en el índice de vigor.



Anexo 9. Interacción NPsMgO x NaCl en el contenido de clorofila.

