

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Estudio de la Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Combinadas con Ácido Giberélico, sobre la Germinación, el Vigor y la Acumulación de Materia Seca en Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

MARÍA ANGÉLICA RIVERA GUILLERMO

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

Estudio de la aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Combinadas
con Ácido Giberélico sobre la Germinación, el Vigor, y la Acumulación de Materia
Seca en Maíz (*Zea mays* L.)

Por:

MARÍA ANGÉLICA RIVERA GUILLERMO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Norma Angélica Ruiz Torres

Asesor Principal


Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez

Coasesor


Dr. Froylán Rincón Sánchez

Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Febrero, 2022

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

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

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

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

Pasante



María Angélica Rivera Guillermo

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por darme la vida, salud y fuerzas para seguir adelante luchando por mis sueños y resistir las difíciles pruebas, por la oportunidad de concluir mi carrera profesional, que durante años fue uno de mis objetivos más anhelado.

A MIS PADRES

Este título se lo dedico orgullosamente, con cariño y amor, a ustedes, por sus esfuerzos, preocupaciones y por todo el apoyo que me brindaron. Gracias por sus consejos he llegado a realizar una de mis grandes metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir, y porque nunca duraron de mí. **A mi mamá, la Sra. Minerba Guillermo López que** siempre supo sacarnos adelante, gracias por haberme apoyado en todo momento, por su amor incondicional, por sus consejos, sus valores, por su gran apoyo en esta fase de mis logros, por estar siempre ahí cuando la necesité, por recordarme todos los días que el sacrificio de hoy es el éxito del mañana.

Gracias por darme la vida, por estar conmigo, sin lugar a duda la mejor mamá del mundo, mi amiga incondicional, el motor que me impulsa a seguir a delante, gracias por ser mi sostén, mi pilar y el mejor regalo que Dios me pudo brindar, gracias por confiar. **A mi padre el Sr. Valerio Rivera Pablo** por haberme apoyado con sus consejos, por sus valores, muchas gracias, papá por darme comida, techo y educación, por sentirte orgulloso de mí, por respetar siempre mis decisiones y luchar conmigo para conseguir este sueño, gracias por darme la vida papá.

A MIS HERMANOS: EDITH, ANSELMO, BLANCA FLOR, JUAN MANUEL Y JOSE LUIS

Por ser ustedes la mayor fuente de inspiración, por estar siempre conmigo, por sus consejos, porque en ustedes encontré la fuerza necesaria para seguir adelante en cada reto de esta fase que parecía que no iba a poder superar. Gracias por ser parte de mi vida, gracias por creer en mí.

A MI ESPOSO E HIJA

A Raúl Fabián Gaytán Medrano por darme su apoyo y amor, así como su confianza para concluir con una meta más. Gracias a mi hija Edith Gaytán Rivera por ser mi inspiración, motivación y orgullo en la vida.

A mi “**ALMA TERRA MATER**” Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por abrirme las puertas y brindarme las herramientas necesarias para formarme profesionalmente, por darme la oportunidad de cumplir mis sueños.

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Por darme la oportunidad y la confianza de realizar este proyecto de investigación, por brindarme su apoyo, por sus consejos, por el tiempo, paciencia y conocimientos para poder cumplir mis sueños de este proyecto de tesis.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A mis padres, que me dieron la vida, por creer en mí y por confiar, por todos los sacrificios que hicieron en todos estos años, porque me impulsaron a seguir adelante, sé que existieron momentos difíciles, pero siempre supieron cómo sacarme adelante. Gracias por este gran regalo que me brindaron, como ustedes bien dicen, es la mejor herencia que me pudieron dar. Gracias por toda su comprensión y paciencia, siempre han estado ahí en todo momento apoyándome. Todo lo que soy ahora se lo debo a ustedes, por los valores y consejos que me inculcaron, nunca me cansare de darle las gracias a Dios por los padres que me dio, por todo eso les agradezco de todo corazón.

A MIS HERMANOS

Edith, Anselmo, Blanca Flor, Juan Manuel y José Luis

Porque son los mejores hermanos, porque he aprendido muchas cosas de cada uno de ustedes; cada uno me ha enseñado diferentes formas de ver la vida, porque son parte esencial en mi vida, y porque ha sido una dicha enorme compartir mi infancia a su lado. Gracias por estar conmigo siempre.

A Edith Rivera Guillermo

A ti hermana que siempre estás ahí a mi lado, cuando más lo necesito, por ser mi cómplice en cada aventura, mi mejor amiga, mi ejemplo a seguir, por cuidarme y apoyarme, porque siempre encuentras las palabras, para alegrar mis días, sé que siempre quieres lo mejor para mí, eres mi gran admiración; tenerte como mi hermana es un privilegio.

A Anselmo Rivera Guillermo

A ti hermano que siempre te has preocupado por mi felicidad y bienestar, siempre estas a mi lado para apoyarme en cada decisión, admiro tus ganas de superarte y la valentía con la que enfrentas las circunstancias, he aprendido mucho de ti, me siento afortunada de ser tu hermana.

A Raúl Fabián Gaytán Medrano

Por el gran apoyo y ánimo que me brindas en todo momento, por compartir días felices, tristes y de alegría, por contar conmigo en todo momento, para concluir mis objetivos y metas, por el amor que me has demostrado día a día, por ser mi amigo, mi cómplice y el padre de mi hija.

A mi hija Edith Gaytán Rivera

Con todo mi amor y cariño te dedico este trabajo, eres mi gran orgullo, la razón de mí existir, mi motivación e inspiración, de seguir alcanzando mis metas y buscar lo mejor para ti.

A MIS AMIGOS

Georgina, Febe Juana, Catalina, Antonia, Margarita, Lizbeth

Por su gran apoyo, siempre estuvieron en los buenos y malos momentos y por su amistad durante estos años de mi preparación profesional, por ser más que unos amigos y compartir conmigo momentos únicos e inolvidables.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO GENERAL.....	3
2.1 Objetivos específicos	3
III. HIPÓTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1 Importancia de la nanotecnología	4
4.2 Nanopartículas.....	4
4.3 Aplicación de la nanotecnología en la agricultura	5
4.4 Efecto de las NPs en la germinación de las semillas	5
4.5 Efecto de las NPs en el vigor de la semilla	6
4.6 Importancia del magnesio en los cultivos	7
4.7 Efecto del AG ₃ en la germinación de semillas	8
V. MATERIALES Y MÉTODOS	9
5.1 Material genético.....	9
5.2 Localización del sitio experimental.....	9
5.3 Imbibición de las semillas	9
5.4 Germinación de semillas.....	9
5.5 Siembra en papel Anchor	10
5.6 Variables Evaluadas	10

5.7 Porcentaje de vigor de germinación.....	10
5.8 Porcentaje de germinación	11
5.9 Plántulas normales de alto vigor y de bajo vigor	11
5.10 Plántulas anormales	11
5.11 Semillas sin germinar.....	12
5.12 Longitud media de plúmula y de radícula	12
5.13 Peso seco de plúmula y de radícula	12
5.14 Relación LP/LR.....	12
5.15 Diseño experimental y análisis.....	12
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	133
VII. CONCLUSIONES.....	2929
VIII. LITERATURA CITADA.....	300

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética, tratadas con NPsMgO y AG ₃	14
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética, tratadas con NPsMgO y AG ₃	15
Cuadro 3. Comparación de medias por tratamientos AG ₃ , de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz de una variedad sintética.....	18
Cuadro 4. Comparación de medias por tratamientos AG ₃ , de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz de una variedad sintética.....	19
Cuadro 5. Comparación de medias por tratamientos con NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.....	23
Cuadro 6. Comparación de medias por tratamiento con NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.....	24
Cuadro 7. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG ₃ y de NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.....	27
Cuadro 8. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG ₃ y de NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.....	28

Cuadro 9. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG₃ y de NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.....29

RESUMEN

Estudio de la Aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio Combinadas con Ácido Giberélico, sobre la Germinación, el Vigor y la Acumulación de Materia Seca en Maíz.

La investigación realizada se llevó a cabo con el objetivo de evaluar mediante un bioensayo el efecto de la aplicación de Nanopartículas de Óxido de Magnesio (NPsMgO) adicionado con Ácido Giberélico (AG₃), en semillas de maíz de una variedad sintética, para determinar si promueve o inhibe el vigor de germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de materia seca. El ensayo se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), localizada en Saltillo, Coahuila, México. La evaluación se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 4, esto es, 12 tratamientos: tres concentraciones de AG₃ (0, 5 y 10 ppm) y cuatro dosis de NPsMgO (0, 25, 50 y 100 ppm) de 20 nm. Los tratamientos consistieron en la aplicación 20 ml de NPsMgO, con 10 ml de AG₃, en 100 semillas imbibidas, las cuales se colocaron en cajas de Petri. El testigo (0 ppm) consistió en imbibir las semillas en agua destilada. Las cajas de Petri fueron mantenidas por 24 horas en una cámara de ambiente controlado Thermo Scientific, a 25°C. Posteriormente, se realizó la siembra, la cual consistió en colocar 25 semillas por repetición entre papel Anchor humedecido con agua; se enrollaron dándole forma de taco, se introdujeron en bolsas de plástico, y se colocaron en una cámara de germinación con ambiente controlado. Las variables evaluadas en el bioensayo fueron: porcentaje de vigor de germinación, germinación, plántulas normales de alto vigor (PAV), plántulas normales de bajo vigor (PBV), plántulas anormales (PA), semillas sin germinar (SSG), longitud media de plúmula (LP), longitud media de radícula (LR), relación de la longitud media de plúmula y de radícula, (LP/LR), peso seco de plúmula (PSP) y peso seco de radícula (PSR). Con la información obtenida se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias utilizando la Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para

establecer el orden de eficiencia de los tratamientos. Los resultados mostraron que al aplicar NPsMgO sin AG₃, las plántulas mostraron una mejor respuesta en cuanto a plántulas normales de alto vigor, peso seco de plúmula, longitud media de plúmula, longitud media de radícula y la relación entre la longitud media de plúmula y de radícula,

Palabras claves: nanopartículas, óxido de magnesio, ácido giberélico, vigor de germinación, peso seco, plúmula y radícula.

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes en México, no sólo por ser Centro de Origen y Diversidad, sino por tener una estrecha relación con la vida, las tradiciones y costumbres de pueblo rural mexicano (O' Leary, 2016). Este cultivo 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. Su importancia, además deriva de su esencia como cultivo básico en la alimentación, por ser el cereal más importante en varios sectores de la economía y la alimentación (Serratos, 2009).

Actualmente, derivado del desarrollo de la ciencia y la tecnología, se han desarrollado innovaciones que han adquirido una gran importancia en los últimos tiempos debido al impacto generado en trabajos experimentales de investigación científica, tales como la nanociencia (NC) y la nanotecnología (NT) (Mendoza y Rodríguez, 2007).

La NT es el estudio y la manipulación de materia en tamaños increíblemente pequeños, generalmente entre uno y 100 nanómetros. La nanotecnología forma parte de la siguiente generación de innovación en la ciencia y la ingeniería, que ha impactado dramáticamente revolucionando el sector salud, textil, materiales, información, la tecnología de la comunicación (Prasad *et al.*, 2014). Implica el uso de materiales a un nivel considerablemente pequeño, amillonesimas partes de un milímetro, confiriendo a los materiales, propiedades diferentes que pueden acarrear una serie de beneficios potenciales y revolucionarios en comparación con objetos de mayor escala (Windebank y Ward, 2004).

La NT es una herramienta de la ciencia moderna innovadora (Sánchez *et al.*, 2009), que puede contribuir al desarrollo de estrategias encaminadas al abastecimiento de la demanda alimentaria.

Por otra parte, el AG₃ es una fitohormona, esencial para el desarrollo de las plantas, encargada de controlar aspectos relacionados con su desarrollo y crecimiento, especialmente la germinación (Rivera Correa, 2017). El ácido giberélico (AG₃) puede romper la latencia de las semillas y remplazar la necesidad de estímulos ambientales tales como luz y la temperatura (Saldívar-Iglesias *et al.*, 2010).

En el presente trabajo se evaluó la aplicación de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de Magnesio (NPsMgO) y de ácido giberélico (AG₃), en semillas de maíz de una variedad sintética, para valorar su efecto a través de la determinación de variables como el vigor de germinación, germinación, plántulas normales de alto vigor, plántulas normales de bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar, longitud media de plúmula y de radícula, peso seco de plúmula y peso seco de radícula, relación de la longitud media de plúmula y de radícula, (LP/LR) a fin de determinar si este tipo de materiales nanoestructurados, funcionan como promotores o inhibidores del crecimiento y desarrollo durante las primeras etapas fenológicas del cultivo.

OBJETIVO GENERAL

Identificar los efectos de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsMgO), combinados con ácido giberélico (AG₃), sobre los procesos de germinación, vigor, desarrollo de plántula, y acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.

Objetivos específicos

1. Determinar si las NPsMgO actúan como un agente promotor de la germinación, el vigor, desarrollo de plántula, y la acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.
2. Determinar el efecto del ácido giberélico a diferentes concentraciones en la germinación, el vigor, desarrollo de plántula, y acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.
3. Conocer la respuesta a la aplicación de diferentes combinaciones de NPsMgO y AG₃ en la germinación, el vigor, el desarrollo de plántula, y acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.

HIPÓTESIS

Hi: Tratar las semillas con NPsMgO y AG₃, promueve el vigor, la germinación, el desarrollo de plántula, y la acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.

Ho: Tratar las semillas con NPsMgO y AG₃, no promueven el vigor, la germinación, el desarrollo de plántula, y la acumulación de materia seca, en una variedad sintética de maíz.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia de la nanotecnología

La aplicación de nanopartículas (NPs) estimula la germinación de la mayoría de las especies, sin embargo, esta respuesta depende de la concentración y el genotipo (Hatami *et al.*, 2014). Por lo tanto, existe la posibilidad de aplicar una amplia gama de NPs para mejorar las características fisiológicas y morfológicas de los cultivos (Ruiz-Torres *et al.*, 2016).

Hoy en día se han generado productos a partir de la nanotecnología (NT), con fines industriales, la gran mayoría en el campo de la biología y de la medicina (Mejía *et al.*, 2009). A través de la NT se han creado materiales y dispositivos con nuevas propiedades y funciones (Jha *et al.*, 2011), representando una de las innovaciones científicas con mayor potencial para la elaboración de nanocompuestos como nanofertilizantes y nanopesticidas para la agricultura (Lira-Saldívar y Méndez-Argüello, 2018).

Di Sia (2017) señala que la NT ha adquirido cada vez más importancia en nuestra sociedad, representa un desafío científico y tecnológico, a través de 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.

Nanopartículas

Actualmente la NT ha ganado gran importancia en muchos campos tal como la medicina, medio ambiente, energía, electrónica y agroalimentaria (Pariona Mendoza, 2015). La NT se considera una innovación científica que estudia,

diseña, crea, sintetiza, manipula, maneja, opera y aplica materiales, aparatos y sistemas a nanoescala (Ruiz-Torres *et al.*, 2016).

La NT es una rama interdisciplinaria cuyos beneficios que derivan de ella, son importantes para revolucionar la agricultura como un enfoque moderno (Prasad *et al.*, 2014).

Aplicación de la nanotecnología en la agricultura

Entre los usos de la NT en la agricultura destacan la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada, estabilización de biopesticidas con NPs, liberación lenta de fertilizantes de NPs, producción de biofertilizantes y micronutrientes para uso eficiente, y aplicaciones de agroquímicos (Ghormade *et al.*, 2011).

Efecto de las NPs en la germinación de las semillas

La calidad de la semilla es un concepto basado en la valoración de diferentes atributos, cada uno con la finalidad de mejorar el establecimiento de la planta en condiciones de campo, entre estos se encuentran la calidad genética, la fisiológica, la física y la sanitaria. Cuando la semilla cuenta con estos cuatro atributos, los agricultores tienen mayores perspectivas de producir un cultivo saludable con rendimientos mejorados (Ruiz-Torres *et al.*, 2016). La aplicación de NPs en dosis bajas estimula la germinación de la mayoría de las especies, sin embargo, esta respuesta depende de la concentración y el genotipo (Hatami *et al.*, 2014).

Liu y Lal (2015) mencionan que las NPs pueden mejorar el crecimiento vegetal en ciertos intervalos de concentraciones y que pueden ser utilizados como nanofertilizantes, mejorando el rendimiento de los cultivos.

Chinnamuthu y Boopathi (2009) indicaron que la aplicación de NPs mejora la germinación de las semillas y los parámetros fisiológicos relacionados, para optimar la capacidad de absorción, degradación de reservas y división celular.

Ruiz-Torres *et al.* (2016) mencionaron que las semillas tratadas con materiales a nano escala generan un cambio en la dinámica de la germinación, observándose un incremento en el porcentaje de germinación y en el índice de velocidad de emergencia. El periodo de germinación se acelera debido a la mayor disponibilidad de agua, y el porcentaje de germinación final se incrementa, lo cual indica condiciones adecuadas para el crecimiento de las semillas. La clave para el aumento de la tasa final de germinación de las semillas es la penetración de nanomateriales en la semilla.

Los efectos beneficiosos de las NPs podrían atribuirse a una mayor producción de enzimas responsables de las reacciones metabólicas. Por otra parte, podrían incrementar los niveles de ácido indolacético (AIA), en las raíces o brotes, que a su vez pueden incrementar el vigor de las semillas y por ende el crecimiento de plántulas (Krishna y Natarajan, 2014).

Efecto de las NPs en el vigor de la semilla

El vigor en las semillas es el potencial biológico que favorece el establecimiento rápido y uniforme, incluso en condiciones desfavorables de campo (Ruiz-Torres *et al.*, 2016). Navarro (2009), indicó que el vigor se puede considerar como la interacción de aquellas propiedades bióticas y abióticas que influyen en las semillas y que determinan su nivel de actividad y su comportamiento en el tiempo: las expresiones de viabilidad, la dormancia, la germinación y la emergencia. Por ello, el vigor no se puede desvincular como parte esencial de la calidad de las semillas.

Importancia del magnesio en los cultivos

El magnesio es uno de los macronutrientes secundarios esenciales para un correcto desarrollo de las plantas, y por ello esencial en la fertilización de cultivos; la deficiencia de magnesio conduce a una reducción en el rendimiento; dado que el magnesio es móvil dentro de la planta, los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas inferiores y viejas (Álvaro, 2020).

La función más importante de este elemento es la de átomo central en la molécula de clorofila. La clorofila es el pigmento que da a las plantas su color verde y lleva a cabo el proceso de la fotosíntesis; también interviene en la activación de un sinnúmero de enzimas necesarias para su desarrollo y contribuye a la síntesis de proteínas. El magnesio tiene movilidad en las plantas, así que los síntomas de su deficiencia aparecen primero en las hojas más viejas: se tornan amarillas con venas verdes (clorosis intervenal). Aunque por lo general la disponibilidad del magnesio para ser absorbido por las plantas no resulta afectada significativamente por el pH de los sustratos para cultivo sin suelo, sí aumenta a medida que éste se incrementa.

La deficiencia de magnesio es provocada por la falta de aplicación, pero también puede ser inducida si existen altos niveles de calcio, de potasio o de sodio en el sustrato. La toxicidad de magnesio es rara en los cultivos de invernaderos y viveros. En altos niveles, este elemento compite con el calcio y el potasio para ser absorbido por la planta, pudiendo causar deficiencia de ellos en el tejido foliar (PROMIX, 2021).

La toxicidad de las NPs puede atribuirse a las siguientes dos acciones: (1) una toxicidad química en base a la liberación de iones (tóxicos); (2) el estrés o estímulos causados por la superficie, el tamaño y/o forma de las partículas. Las plantas sometidas a altas concentraciones de NPs sufren pérdida en la capacidad de la germinación, reducción en la tasa relativa de crecimiento, y altera la generación de especies reactivas de oxígeno (Ruiz-Torres *et al.*, 2016).

Efecto del AG₃ en la germinación de semillas

El AG₃ posee más de un sitio de acción en la estructura de la semilla y está directamente relacionado con la terminación de la latencia del embrión, con la velocidad de germinación de semillas y el crecimiento inicial de las plántulas.

Las giberelinas promueven la germinación de la semilla, se acumula rápidamente en los embriones después de 24 h de inhibición. Esta hormona estimula la síntesis de enzimas hidrolíticas, principalmente alfa-amilasa; en la capa de aleurona las amilasas degradan el almidón y los productos de la digestión almacenados en la aleurona y el endospermo almidonoso, y luego son movilizados al escutelo para iniciar el crecimiento de las plántulas (Sánchez Ramos, 2014). La inmersión de semillas en GA₃ puede elevar índices germinativos y uniformizar la emergencia de plántulas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

En este trabajo de investigación se usó semilla de una variedad sintética adaptada al sur de Tamaulipas.

Localización del sitio experimental

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Saltillo, Coahuila, México.

Imbibición de las semillas

Para determinar el efecto de la aplicación de AG_3 y de $NP_{s}MgO$ en la germinación de semillas de maíz, se establecieron 12 tratamientos con cuatro repeticiones, AG_3 (0, 5 y 10 ppm) y $NP_{s}MgO$ (0, 25, 50 y 100 ppm), cada repetición consistió en 25 semillas cada una.

Los tratamientos se sometieron a un proceso de sonicación de 10 minutos para asegurar una perfecta dispersión del AG_3 y de las $NP_{s}MgO$ (20 nm), para lo cual se utilizó un sonicador marca AS2060B. Enseguida se añadió cada solución con ayuda de una micropipeta, aplicando 20 ml de $NP_{s}MgO$ y 10 ml de AG_3 en cada caja de Petri, según el tratamiento correspondiente y realizando una aspersión uniforme sobre las semillas. Para cada tratamiento se imbibieron 100 semillas de maíz (4 repeticiones de 25 semillas cada una).

Germinación de semillas

Para la aplicación de las soluciones con $NP_{s}MgO$ se utilizaron doce cajas de Petri, las cuales fueron esterilizadas de manera previa. En seguida, con ayuda de unas pinzas estériles se distribuyeron 100 semillas de maíz en cada una.

Posteriormente, las cajas de Petri con las semillas tratadas se colocaron en una cámara de ambiente controlado Thermo Scientific por 24 horas, a 25°C.

Siembra en papel Anchor

Una vez concluido el periodo de imbibición, se realizó la siembra, la cual consistió en colocar 25 semillas por repetición sobre papel Anchor humedecido con agua destilada, en una hilera con distribución homogénea a lo largo del papel. En seguida se cubrieron las semillas con otra hoja de papel Anchor previamente humedecido y se enrolló, dándole forma de taco; posteriormente, se acomodaron dentro de una bolsa de polietileno, que después se introdujo dentro de un contenedor de plástico y nuevamente se colocó en la cámara de ambiente controlado Thermo Scientific a 25°C.

Variables Evaluadas

Las variables evaluadas fueron el vigor de germinación (%), porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas normales de alto y de bajo vigor, porcentaje de plántulas anormales, porcentaje de semillas sin germinar, la longitud media de plúmula (cm), la longitud media de radícula (cm), relación de la longitud media de plúmula y de radícula, el peso seco de plúmula (mg/plúmula) y de radícula (mg/radícula).

Porcentaje de vigor de germinación

Al cuarto día después de la siembra, se realizó el primer conteo para determinar el número de plántulas normales (plántulas con raíz y tallo desarrollado, y cada estructura por lo menos dos veces el tamaño de la longitud de la semilla), 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.

Las plántulas normales se consideraron aquellas que tuvieron la capacidad para germinar y continuar su proceso de desarrollo e indica el potencial biológico de la

semilla de manera satisfactoria bajo condiciones favorables de luz, humedad y temperatura.

Porcentaje de germinación

Al séptimo día se realizó la segunda evaluación; se realizó el segundo conteo para conocer el porcentaje de germinación, tomando en cuenta el porcentaje de plántulas normales de alto vigor y de plántulas normales de bajo vigor (PNAV y PNBV, respectivamente).

Plántulas normales de alto vigor y de bajo vigor

Se realizó un conteo de todas las plántulas que germinaron; para obtener el porcentaje de plántulas normales de alto vigor, se consideraron todas aquellas plántulas que presentaron un desarrollo normal en sus estructuras morfológicas, (con raíz primaria bien definida y desarrollada, y tallo bien desarrollado), y para obtener el porcentaje de plántulas normales de bajo vigor, se consideraron todas aquellas plántulas que presentaron un desarrollo regular en sus estructuras (raíz primaria con poco vigor, no bien desarrolladas, y un tallo con menor desarrollo morfológico).

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 (con raíz primaria dañada o sin desarrollo), tal es el caso de plántulas con un tamaño dos veces menor al que posee su semilla o que no desarrollaron plúmula o radícula.

Semillas sin germinar

Se realizó un conteo de todas aquellas semillas que no lograron germinar por causa de factores intrínsecos, el resultado fue expresado en porcentaje.

Longitud media de plúmula y de radícula

Para realizar la estimación de la longitud media de plúmula y de radícula, se midieron todas las plántulas normales de cada tratamiento y repetición, para longitud media de plúmula se midió del cuello de la plántula hasta la parte apical y del cuello de la plántula hasta el ápice de la raíz principal para longitud media de radícula, utilizando una tabla con hoja milimétrica graduada en cm.

Peso seco de plúmula y de radícula

Se obtuvo al finalizar la evaluación de las demás variables, y consistió en llevar todas las plántulas normales por repetición dentro de bolsas de papel de estraza, previamente identificadas, para situarlas a una estufa de secado (Arsa HORNO), por un lapso de 24 horas, a una temperatura de 72°C.

Transcurrido el tiempo de las muestras dentro de la estufa de secado se colocaron en un desecador, a fin de evitar que tomara humedad del ambiente, en seguida se pesó cada muestra en una balanza analítica AND-HR200, para conocer el peso de materia seca expresado en mg/plúmula y mg/radícula.

Relación LP/LR. Se obtuvo un índice de crecimiento de la plúmula con respecto a la radícula, obteniendo el cociente de LP/LR.

Diseño experimental y análisis

El estudio se estableció en un diseño completamente al azar, con arreglo factorial (3 x 4), siendo dos los factores en estudio: 1: AG₃ (1.0, 5.0, 10 ppm) y NPsMgO (0, 25, 50 y 100 ppm). Las variables evaluadas fueron analizadas para determinar diferencias estadísticas, también se realizó una comparación de medias con la Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), utilizando el paquete estadístico SAS (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadros 1 y 2), del bioensayo de germinación de semillas, al ser sometidas a diferentes concentraciones de NPsMgO y de AG₃, se encontró que las concentraciones de ácido giberélico (AG₃) no mostraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.01$) en el vigor germinación, porcentaje de germinación, plántulas de alto vigor, plántulas de bajo vigor, plántulas anormales, y semillas sin germinar; mientras que para la longitud media de plúmula, longitud media de radícula, relación de la longitud media de plúmula y de radícula, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) y diferencias $P \leq 0.05$ en el peso seco de radícula y peso seco de plúmula.

En cuanto a los tratamientos con NPsMgO (0, 25, 50 y 100 ppm), se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para plántulas normales de alto vigor y longitud media de radícula; para el porcentaje de plántulas normales de bajo vigor y longitud media de plúmula, hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y no significativas ($P \leq 0.05$) para vigor de germinación, porcentaje de germinación, plántulas anormales, semillas sin germinar, peso seco de radícula, peso seco de plúmula, y relación de la longitud media de plúmula y de radícula, no se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

La interacción AG₃ x NPsMgO no fue significativa ($P \leq 0.05$) para las variables vigor de germinación, porcentaje de germinación, plántulas normales de bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar, y peso seco de plúmula; la interacción mostró significancia ($P \leq 0.01$) para la longitud media de plúmula, longitud media de radícula, relación de la longitud media de plúmula y de radícula y peso seco de radícula (Cuadro 2); también fue significativa para plántulas normales de alto vigor ($P \leq 0.05$).

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética, tratadas con NPsMgO y AG₃.

F.V.	G.L.	Vigor (%)	Germinación (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)
AG ₃	2	1.33 NS	1.33 NS	1.00 NS	4.33 NS	24.33 NS	21.00 NS
NPsMgO	3	20.44 NS	21.66 NS	193.22 **	129.33 *	7.44 NS	11.55 NS
AG ₃ * NPsMgO	6	7.11 NS	12.00 NS	111.22 *	68.33 NS	4.77 NS	8.55 NS
Error	36	20.44	9.22	35.22	30.88	10.33	11.11
C.V		4.84	4.66	6.80	81.33	110.21	111.11

**=Diferencias significativas ($P \leq 0.01$); *= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); NS= Diferencias no significativas; F.V.= Fuente de variación; AG₃= Ácido giberélico; NPs= Nanopartículas; AG₃*NPs= Interacción ácido giberélico por nanopartículas; CV= Coeficiente de variación; GL= Grados de libertad; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PBV= Plántulas normales de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar;

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética, tratadas con NPsMgO y AG₃.

F.V.	G.L	LP (cm)	LR (cm)	LP/LR	PSR (mg/radícula)	PSP (mg/plúmula)
AG ₃	2	146.28 **	101.40 **	1.20 **	39.25 *	60.67 *
NPsMgO	3	57.97 *	210.12 **	0.40 NS	17.78 NS	9.13 NS
AG ₃ * NPsMgO	6	98.61 **	156.34 **	1.09 **	38.91 **	20.98 NS
Error	36	21.02	14.47	0.20	7.96	11.83
C.V		28.52	23.66	41.98	14.63	10.10

**=Diferencias significativas; *= Diferencias significativas; NS= Diferencias no significativas; F.V.= Fuente de variación; AG₃ * NPs= Interacción del ácido giberélico por nanopartículas; CV= Coeficiente de variación; GL= Grados de libertad; LP= Longitud media de plúmula; LR= Longitud media de radícula; LP/LR= índice de longitud media de plúmula y radícula; PSR= Peso seco de radícula; PSP= Peso seco de plúmula.

En el Cuadro 3 se presenta la comparación de medias para las variables evaluadas al aplicar AG₃, acorde al análisis de varianza no hubo diferencias estadísticas en el vigor de germinación, germinación, plántulas normales de alto vigor, plántulas normales de bajo vigor, plántulas anormales y semillas sin germinar.

La longitud media de la plúmula mostró un efecto positivo ante la aplicación de GA₃ cuyos tratamientos fueron superiores con respecto al testigo e iguales entre sí. La concentración 5 ppm (16.57 cm), y 10 ppm (16.26 cm) fueron superiores al testigo (0 ppm, 15.37 cm) (Cuadro 4).

La radícula mostró un efecto diferente con respecto a la plúmula; la longitud media de radícula bajo concentración de 10 ppm (16.66 cm), superó estadísticamente al resto de los tratamientos, logrando un incremento medio de 0.84 cm en comparación a testigo (0 ppm), que se obtuvo 15.82 cm.

Para la relación de la longitud media de plúmula y de la radícula, en la concentración correspondiente a 5 ppm (1.13 cm), fue superior al resto, donde mostró un incremento medio de 0.09 cm, en comparación a la concentración 10 ppm.

En la variable peso seco de radícula, en la concentración 10 ppm, se obtuvo el mejor resultado con 20.84 cm, en comparación al testigo que obtuvo 17.70 cm. Mientras que en la variable peso seco de plúmula, se obtuvo el mayor resultado (35.95 mg plúmula⁻¹) con la concentración de 5 ppm, obteniendo un incremento de 3.89 cm, en comparación al testigo que obtuvo 32.06 cm.

Los resultados indican que el uso de AG₃, tiene un efecto positivo en las variables relacionadas con el crecimiento y desarrollo de la plántula (LP, LR, PSP, y PSR).

Saavedra (1987) menciona que al estudiar el efecto del ácido giberélico sobre la germinación en semillas de zapote, este favoreció el incremento, la uniformidad y la aceleración de la germinación, logrando el mayor porcentaje de germinación

(86.75 %) con la concentración de AG₃ a 100 ppm, mientras que el testigo solo alcanzó el 63.75 %.

Valerio (2016) menciona que el ácido giberélico puede romper la latencia de las semillas y frecuentemente reemplaza la necesidad de estímulos ambientales, tales como la luz y la temperatura.

Arboleda (1988) indica que la adición del AG₃ a las semillas de limón rugoso (*Citrus jambiri*), humedecida durante 5 segundos, favorece el incremento, velocidad, uniformidad y acelera la germinación. Así mismo encontró que el AG₃ a 50 ppm, a nivel laboratorio y vivero, alcanzó los más altos porcentajes de germinación 94 % y 95.2 %, respectivamente, con relación al testigo que presentó 68 % y 74.2 %, correspondientemente.

El AG₃ actúa en el proceso de germinación, promoviendo el crecimiento del embrión de una semilla. El embrión libera la giberelina y esta viaja hasta el endospermo de la semilla. Luego permite la inducción enzimática de la amilasa, haciendo que el almidón se desintegre hasta convertirse en azúcar que usara el embrión (Yabuta, 1935).

Peretti (1992) menciona que el crecimiento de plántulas (radicular y vástago), se toma como dato de velocidad de crecimiento, es un atributo importante del vigor de las semillas, por lo que la evaluación de estas variables permite determinar la velocidad de crecimiento o la inhibición del crecimiento con respecto al testigo, en un periodo determinado.

Cuadro 3. Comparación de medias por tratamiento con AG₃, de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz de una variedad sintética.

Tratamiento	Vigor	Germinación	PAV	PBV	PA	SSG
AG ₃ (ppm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	94 a	94 a	88 a	6 a	3 a	3 a
5	94 a	94 a	87 a	7 a	2 a	4 a
10	93 a	94 a	87 a	7 a	4 a	2 a
Media	94	94	87	7	3	3
Tukey ($\alpha=0.05$)	3.24	3.14	4.25	3.98	2.30	2.39

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$), ppm= partes por millón; AG₃= Ácido giberélico. Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación; plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PBV= Plántulas normales de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar.

Cuadro 4. Comparación de medias por tratamiento con AG₃, de las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de maíz de una variedad sintética.

Tratamiento	LP	LR	LP/LR	PSR	PSP
AG ₃ (ppm)	(cm)	(cm)		(mg/radícula)	(mg/plúmula)
0	15.37 b	15.82 b	1.03 b	17.70 b	32.06 b
5	16.57 a	15.73 b	1.13 a	19.30 ab	35.95 a
10	16.26 a	16.66 a	1.04 b	20.84 a	34.14 ab
Media	16.06	16.07	1.06	18.66	33.66
Tukey ($\alpha=0.05$)	0.65	0.54	0.04	2.02	2.46

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); ppm= partes por millón; AG₃= Ácido giberélico. LP= Longitud media de plúmula; LR= Longitud media de radícula; LP/LR= índice de longitud media de plúmula y radícula; PSR= Peso seco de radícula; PSP= Peso seco de plúmula.

En los Cuadros 5 y 6 se muestra la comparación de medias para las variables evaluadas con diferentes concentraciones de NPsMgO (0, 25, 50, y 100 ppm), se observó que no hubo diferencias estadísticas para las variables vigor de germinación, germinación, plántulas anormales, semillas sin germinar y peso seco de plúmula. El efecto de la aplicación de NPsMgO se observó en PAV, PBV, LP, LR, LP/LR y PSR, donde hubo diferencias significativas entre los valores medios.

En la variable plántulas normales de alto vigor a concentraciones de 25, 50 y 100 ppm, generó el mismo efecto, ya que son estadísticamente iguales, con resultados de 87, 90 y 90 %, en comparación al testigo (0 ppm), que mostró el menor porcentaje, con un resultado de 82 %; mientras que en la variable plántulas normales de bajo vigor, el testigo (0 ppm) obtuvo un 12 %, en comparación a las concentraciones de 25, 50 y 100 ppm, teniendo como resultado promedio 7%, estas concentraciones resultaron estadísticamente significativas (Cuadro 5). Estos resultados indican que el uso de NPsMgO mejora el vigor de plántulas.

En la variable longitud media de plúmula se observó que el testigo y la concentración de 25 ppm presentaron resultados estadísticamente iguales (16.38 % y 16.44 %, respectivamente), en comparación con la concentración de 100 ppm, que obtuvo un valor estadísticamente menor. Mientras que para la variable longitud media de radícula, se obtuvieron resultados positivos en el testigo (16.54 cm), a 25 ppm (16.61 cm), y a 50 ppm (16.34 cm) en comparación a la concentración de 100 ppm, que obtuvo 16.07 cm (Cuadro 6).

La variable relación de la longitud media de plúmula y de radícula, presenta un valor de 1.12 cm, a una concentración de 100 ppm, en comparación a la concentración de 25 ppm, que obtuvo 1.06 cm, presentando diferencias estadísticas.

En la variable peso seco de radícula, se observaron diferencias estadísticas, a una concentración de 50 ppm se obtuvo 20.82 cm, siendo este el resultado más alto y estadísticamente diferente, en comparación con el testigo (0 ppm), que obtuvo 18.23 cm.

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

Méndez *et al.* (2016) evaluaron en plantas de Chile, la aplicación foliar de NPsZnOAg al 2.5% en peso, dosis que presentó 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.

Manfrini (2004) menciona que la pérdida del vigor de la semilla está relacionada con la reducción de la habilidad que tiene para llevar a cabo todas sus funciones fisiológicas, que determinan su nivel de actividad y su comportamiento, y que la semilla es más vigorosa cuando su comportamiento potencial es estable.

Las NPs generan gran influencia en el crecimiento y desarrollo de plántulas, en etapas tempranas; además resulta compatible con el sector agrícola, debido a la alta eficiencia que poseen para estimular el crecimiento vigoroso, en plántulas sometidas a tratamiento de NPs (Vasanth *et al.*, 2016).

El incremento en el porcentaje de vigor podría atribuirse a la penetración de nanomateriales principalmente en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo (Ruiz-Torres *et al.*, 2016). En otras investigaciones Liu y Lal (2016), confirman que al analizar los resultados derivados de aplicaciones de NPsZnO, pueden utilizarse como nanofertilizantes, ya que mejoran el potencial de germinación y el crecimiento de la plántula; señalan que diversas NPs metálicas mejoran significativamente el crecimiento de las plantas y tienen el potencial para incrementar la productividad agrícola.

Cuadro 5. Comparación de medias por tratamiento con NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.

Tratamiento	Vigor	Germinación	PAV	PBV	PA	SSG
NPsMgO (ppm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	93 a	93 a	82 b	12 a	4 a	2 a
25	92 a	93 a	87 a	6 b	3 a	4 a
50	95 a	96 a	90 a	6 b	2 a	2 a
100	94 a	95 a	90 a	4 b	3 a	3 a
Media	94	94	87	7	3	3
Tukey ($\alpha=0.05$)	3.74	3.63	4.91	4.60	2.66	2.76

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); ppm= partes por millón; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación; plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PBV= Plántulas normales de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar.

Cuadro 6. Comparación de medias por tratamiento con NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.

Tratamiento	LP	LR	LP/LR	PSR	PSP
NPsMgO (ppm)	(cm)	(cm)	(cm)	(mg/r)	(mg/p)
0	16.38 a	16.54 a	1.06 ab	18.23 b	33.90 a
25	16.44 a	16.61 a	1.04 b	19.69 ab	34.76 a
50	16.00 ab	16.34 a	1.04 ab	20.82 a	34.66 a
100	15.46 b	14.80 b	1.12 a	18.39 ab	32.87 a
Media	16.07	16.07	1.06	19.28	34.04
Tukey ($\alpha=0.05$)	0.75	0.62	0.07	2.33	2.84

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); ppm= partes por millón; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación; plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PBV= Plántulas normales de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar

En los Cuadros 7, 8 y 9 se presenta la interacción de los niveles de NPsMgO en cada nivel de AG₃ x NPsMgO, para las variables evaluadas para estimar la germinación de semillas de maíz y el desarrollo de plántulas.

Para plántulas normales de alto vigor, al comparar las medias, se observó que se obtiene el mismo resultado al no aplicar AG₃, con un promedio de 88 %, en comparación con la aplicación de 5 y 10 ppm, ya que se obtuvo un resultado de 87 % para ambas concentraciones. Sin embargo, existió un incremento considerable de la germinación empleando 10 ppm de GA₃ y 50 y 100 ppm de NPsMgO.

Para la variable peso seco de radícula, en promedio se obtuvo 20.83 %, con la concentración de 10 ppm de AG₃, siendo el mejor resultado, en comparación al testigo (0 ppm), que obtuvo 19.20 %, y 19.30 % de 5 ppm de AG₃. En la interacción se observó que la mayor PSR se obtuvo bajo las combinaciones de 5 ppm AG₃ x 50 ppm NPsMgO, 10 ppm AG₃ x 50 ppm NPsMgO, 10 ppm AG₃ x 100 ppm NPsMgO. El PSP mostró un efecto positivo de la combinación de AG₃ y NPsMgO y mejoró en la combinación 5 ppm AG₃ x 25 ppm NPsMgO, 10 ppm AG₃ x 50 ppm NPsMgO.

En la longitud media de la plúmula y la radícula no se observó una tendencia definida, aunque la respuesta fue positiva con 10 ppm AG₃ y 50 ppm NPsMgO y 5 ppm AG₃ y 25 ppm NPsMgO; mientras que la radícula fue de mayor longitud a 10 ppm AG₃ y 0 ppm NPsMgO, 5 ppm AG₃ y 50 ppm NPsMgO y 0 ppm AG₃ y 0 ppm NPsMgO.

El resultado de la combinación de AG₃ x NPsMgO mostró un efecto significativo deseable sobre PSR, PSP, LP y LR.

La variable índice de la longitud media de plúmula y de radícula se observó que aplicar 5 ppm de AG₃ se obtuvo un promedio de 1.13 %, este fue el mejor resultado en comparación al testigo (0 ppm), que obtuvo un promedio de 1.02 % y 1.03 % al aplicar 10 ppm.

En un estudio realizado en raíces y brotes de plántulas de sojas (*Vigna radiata*) y garbanzo, la aplicación de NPsZnO estimuló el crecimiento y desarrollo, pero se produjo un efecto tóxico al utilizar 2000 ppm, que se presentó en las plántulas, esto indica que esta especie responde a la aplicación de NPs en dosis bajas, siendo fitotóxico a dosis altas (Pramod *et al.*, 2011).

Tester y Davenport (2003) observaron que la intensidad con que cada condición de estrés afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas, depende de varios factores, especie, cultivar, estado fenológico, tipos de sales solubles, intensidad y duración del estrés, condiciones edafoclimáticas.

Delouche (2010) menciona que el vigor es el principal componente de la calidad, y es un atributo exclusivo de las semillas capaces de germinar, por esta razón ostenta un papel esencial en el proceso de germinación, al igual que sus efectos determinan el comportamiento de las semillas durante la germinación y emergencia de plántulas. A este respecto, en este trabajo de investigación se observó que las variables relacionadas con el vigor de la plántula tienen una respuesta positiva a la aplicación de NPsMgO, combinadas con AG₃.

Cuadro 7. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG₃ y NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.

AG ₃ ppm	NPsMgO ppm	PAV (%)	PSR (%)	PSP (mg/p)	LP (cm)	LR (cm)	LP/LR (cm)
0	0	86 a	20.66 a	34.54 a	16.56 a	17.35 a	0.98 ab
	25	89 a	18.24 ab	32.19 ab	16.33 a	17.02 a	0.98 ab
	50	87 a	16.90 ab	32.10 ab	14.20 b	15.10 b	1.02 ab
	100	88 a	15.01 b	29.40 b	14.38 b	13.78 b	1.12 a
	Media	88	19.20	32.05	15.36	15.81	1.02
	Tukey ($\alpha=0.05$)	4.1	5.1	4.2	1.9	2.01	0.10

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); AG₃= Ácido giberélico; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; ppm= partes por millón; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PSR= Peso seco de radícula; PSP= Peso seco de plúmula; LP= Longitud media de plúmula; LR= Longitud media de radícula; LP/LR= Relación de la longitud media de plúmula y de radícula.

Cuadro 8. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG₃ y NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.

AG ₃ ppm	NPsMgO Ppm	PAV (%)	PSR (%)	PSP (mg/p)	LP (cm)	LR (cm)	LP/LR
5	0	86 a	15.65 c	36.06 ab	16.56 ab	14.38 b	1.27 a
	25	85 a	20.99 ab	38.27 a	17.52 a	16.44 a	1.13 ab
	50	89 a	23.66 a	35.50 b	16.28 ab	17.30 a	0.98 b
	100	89 a	16.92 bc	33.96 c	15.94 b	14.81 ab	1.14 ab
	Media	87	19.30	35.94	16.57	15.73	1.13
	Tukey ($\alpha=0.05$)	10.60	5.01	2.25	1.30	1.99	0.28

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); AG₃= Ácido giberélico; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; ppm= partes por millón; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PSR= Peso seco de radícula; PSP= Peso seco de plúmula; LP= Longitud media de plúmula; LR= Longitud media de radícula; Índice de longitud media de plúmula y radícula.

Cuadro 9. Comparación de medias por combinación de tratamientos con AG₃ y NPsMgO, para variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de maíz de una variedad sintética.

AG ₃ ppm	NPsMgO Ppm	PAV (%)	PSR (%)	PSP (mg/p)	LP (cm)	LR (cm)	INDICE (cm)
10	0	73 b	18.36 ab	31.11 b	16.02 ab	17.94 a	0.92 ab
	25	87 ab	19.86 ab	33.81 ab	15.48 b	16.37 ab	0.99 ab
	50	94 a	21.89 a	36.38 a	17.43 a	16.58 ab	1.13 a
	100	94 a	23.23 a	35.25 a	16.06 ab	15.79 b	1.09 a
	Media	87	20.83	34.13	16.24	16.67	1.03
	Tukey ($\alpha=0.05$)	16.31	4.20	3.12	1.41	2.1	0.11

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$); AG₃= Ácido giberélico; NPsMgO= Nanopartículas de Óxido de Magnesio; ppm= partes por millón; PAV= Plántulas normales de alto vigor; PSR= Peso seco de radícula; PSP= Peso seco de plúmula; LP= Longitud media de plúmula; LR= Longitud media de radícula; Índice de longitud media de plúmula y radícula.

CONCLUSIONES

La aplicación de AG_3 a semillas de maíz durante el periodo de imbibición, tuvo un efecto positivo al incrementar el porcentaje de plántulas normales de alto vigor, así como la longitud media de plúmula, longitud media de radícula, y los pesos secos de plúmula y de radícula. Por lo tanto, el AG_3 tiene el potencial para ser utilizado como promotor del vigor y del crecimiento de raíz y de tallo, así como en la acumulación de biomasa.

Las NPsMgO (25 y 50 ppm) suministradas durante la imbibición de las semillas, tuvieron un efecto positivo en el crecimiento de la plúmula y de la radícula.

Al tratar semillas con NPsMgO a 50 ppm, se observó incremento en el peso seco de radícula, con respecto al testigo, lo cual las convierte en una opción para mejorar la biomasa de la raíz.

Efecto fitotóxico se observó en el crecimiento de la plúmula y de la radícula al aplicar NPsMgO a 100 ppm.

Para el uso combinado de AG_3 y de NPsMgO, se observó a través de las interacciones que, para obtener mayor porcentaje de plantas normales de alto vigor, incremento en el peso seco de plúmula, longitud media de plúmula, longitud media de radícula y la relación entre la longitud media de plúmula y de radícula, se debe aplicar el AG_3 a una concentración de 5 ppm y las NPsMgO a 50 ppm. Mientras que, para obtener mayor peso seco de radícula, se deberá aplicar la concentración de 10 ppm de AG_3 , combinadas con NPsMgO a 50 ppm.

LITERARURA CITADA

- Álvaro, J. 2020. El magnesio y su importancia en el crecimiento vegetal. Ferti box. Análisis agrícola. Disponible en: <http://www.fertifox.net>. Fecha de consulta 28 de noviembre, 2021.
- Arboleda, A.W. 1988. Efecto del Ácido Giberélico sobre la Germinación de la Semilla de Limón Rugoso (*Citrus jambhiri* L.). Tesis ing. Agrónomo UNP. 78 p. Piura - Perú.
- Ayala-Contreras, C.L. 2015. Respuesta Fisiológica a Salinidad en dos Genotipos de Maíz. Tesis de Maestría en Tecnología de Granos y Semillas Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Chinnamuthu, C. R., and Boopathi, P. M. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. Madras Agricultural Journal, 96(1/6), 17-31.
- 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, 237, 1079-1080.
- Ghormade, V., Deshpande, M. V., and Paknikar, K, M. 2011. Perspectives for nano- biotechnology enabled protection and nutrition of plants. Biotechnology advances, 29(6), 792-803.
- Hatami, M., Ghorbanpour, M., and Salehjarjomand, H. 2014. Nano-anatase TiO₂ modulates the germination behavior and seedling vigourity of some commercially important medicinal and aromatic plants.
- Hedden, P., and Sponsel, V. 2015. A century of gibberellin research. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(4), 740-760.

- Jha, Z., Behar, N., Sharma, S. N., Chandel, G., Sharma, D. K., and Pandey, M. P. 2011. Nanotechnology: prospects of agricultural advancement. *Nano Vision*, 1(2), 88-100.
- Krishna, K., and Natarajan, N. 2014. Customizing zinc oxide, silver, and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology* 7(9):1376-1381.
- Lira-Saldivar, R. H., and Méndez-Argüello, B. 2018. Nanotechnology: A new scientific paradigm on agricultural production of the XXI century. *Ecosist. Recur. Agropec. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13):1-2.
- Liu, R., and Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the total environment*. Vol, (514), 131-139. Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104
- Manfrini, D. 2004. Análisis de vigor en semillas. Plan agropecuario. Instituto nacional de semillas. Uruguay. *Rev. Plan Agropecuario*, (111), 56-58.
- Mejías Sánchez, Y., Cabrera Cruz, N., Toledo Fernández, A. M., y Duany Machado, O. J. 2009. La nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. *Revista Cubana de Salud Pública*, 35.
- Méndez Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., y Lira-Saldivar, R. H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8(17), 140-156.
- Mendoza Uribe, G., y Rodríguez-López, J. L. 2007. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles Latinoamericanos*, 14(29), 161-186.
- Navarro, M. 2009. Interactive behavior of germination, dormancy, emergence, and initial growth as biological attributes to evaluate the vigor of the seeds of

- 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/>.
- Peretti, A. 1994. Manual para Análisis de Semillas. Hemisferio Sur. Argentina.
- Pramod, M., Dhoke, S. K., Khanna, A. S., and Tarafdar, J. C. 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., Kumar, V., and Prasad, K. S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6), 705-713.
- PROMIX. 2021. La función del magnesio y su importancia en el crecimiento vegetal. Centro de formación. Horticulture. Disponible en: <https://www.pthorticulture.com>.
- Rivera, J. D., Correa, Y. M., y Ocampo, D. M. 2017. Estandarización de un método cromatográfico para la identificación del ácido giberélico en semillas de maíz (*Zea mays* L.). *Ciencia En Desarrollo*, 8(2), 51-60.
- Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. Y., Lira-Saldívar, R. H., Vera Reyes, I., y Méndez Argüello, B. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. *Agronanotecnología*.
- Saavedra, J.F. 1987. Efecto del AG₃ Sobre la Germinación de la Semilla de Zapote (*Cappari sanguolata* R y P) en Condiciones de Laboratorio y Almacigo. Tesis. Ing. Agr. Universidad Nacional de Piura. 65 p.
- Saldívar-Iglesias, P., Laguna-Cerda, A., Gutiérrez-Rodríguez, F., y Domínguez-Galindo, M. 2010. Ácido giberélico en la germinación de semillas de Jaltomata procumbens (Cav.) JL Gentry. *Agronomía Mesoamericana*, 21(2), 327-331.

- SAS. 2004. Statistical Analysis System, User's Guide. Statistical. Version 7th ed. SAS. Inst. Inc. Cary. N.C. USA.
- Yabuta, T. 1935. Biochemistry of the 'bakanae' fungus of rice. *AgricHort* (Tokyo) 10:17–22
- Tester, M., and R. Davenport. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann. Bot* 91(5): 503-527.
- Valerio Santillana, R. A. 2016. Efecto de la concentración de ácido giberélico en el crecimiento y rendimiento de tres cultivares de pimiento paprika (*Capsicum annuum* L.). Tesis de ingeniera, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru.
- Vasanth, N., Melchias, G., and Kumaravel, P. 2016. Evaluation of silver bio-nanoparticles synthesized with the mediation of *Zizyphus jujuba* fruit extract on bactericidal compatibility and seed viability. *Indo American Journal of Pharmaceutical Research* 6, 6125-6135.
- Windebank, S., and Ward, B. 2004. Nanotechnologies bring great potential and need for responsible development. Royal Academy of Engineering. Disponible *En*: <https://www.raeng.org.uk>.