

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTO DE MALTODEXTRINA Y NANOPARTICULAS DE OXIDO DE ZINC
EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DEL PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

Tesis

Que presenta OMAR UCAN TUCUCH
como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Horticultura

Saltillo, Coahuila

Julio 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTO DE MALTODEXTRINA Y NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC
EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DEL PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

Tesis

Que presenta OMAR UCAN TUCUCH
como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Horticultura

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Alonso Méndez López'.

Dr. Alonso Méndez López
Director UAAAN

Una firma manuscrita en azul que parece decir 'Rebeca Betancourt Galindo'.

Dra. Rebeca Betancourt Galindo
Director Externo

Saltillo, Coahuila

Julio 2023

IMPACTO DE MALTODEXTRINA Y NANOPARTICULAS DE OXIDO DE ZINC
EN EL CRECIMIENTO Y CALIDAD DEL PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

Tesis

Elaborado por OMAR UCAN TUCUCH como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Alonso Méndez López

Asesor principal



Dr. Antonio Juárez Maldonado

Asesor



Dra. Miriam Sánchez Vega

Asesor



Dra. Rebeca Betancourt Galindo

Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Julio 2023

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme dado la oportunidad de seguir creciendo como profesional de la agronomía y las facilidades otorgadas durante mis estudios de postgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico a través de la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de Maestría en Ciencias en Horticultura.

Al Dr. Alonso Méndez López, por su apoyo incondicional durante todo el ciclo de la Maestría y los consejos brindados para poder concluir el presente proyecto.

A la Dra. Miriam Sánchez Vega, por su apoyo en la parte experimental y sus conocimientos brindados.

A la Dra. Rebeca Betancourt Galindo, por su apoyo en el trabajo de laboratorio, por el apoyo para las revisiones realizadas al proyecto y por la síntesis y facilitación de las nanopartículas de óxido de zinc usadas en esta investigación.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por su conocimiento, consejos y apoyo en el presente proyecto.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, por su apoyo en la parte experimental y sus conocimientos brindados.

A todos los profesores del programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura

¡Muchas gracias!

DEDICATORIAS

A Dios eterno que me permito terminar esta etapa de mi preparación profesional, agradezco mucho su presencia en mi vida porque sin él no hubiera podido lograr esta meta. ¡Gracias Dios por estar conmigo!

A mis padres María Victoria Tucuch Vargas y Moisés Ucan Chan, ellos son mis padres que amo mucho, a ellos le debo su dedicación, su entrega y su valor por querer darme un futuro mejor.

A mi hermano M.C. Eduardo Moisés Ucan Tucuch, por ser un ejemplo de superación y darme los mejores consejos cuando los he necesitado.

A mi amigo Pedro Damián Cab Palma, por apoyarme siempre a la distancia, por estar ahí en las buenas y en las malas. Este triunfo también es tuyo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	vii
DEDICATORIAS	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
La Nanotecnología	4
La nanotecnología en el sector agrícola	4
Bioestimulación Vegetal	5
Nanopartículas de óxido de zinc	6
Usos de las nanopartículas de óxido de zinc	6
Función del zinc en las plantas	7
Las nanopartículas de óxido de zinc como bioestimulantes vegetales	8
Maltodextrina	9
Modo de acción de la maltodextrina como bioestimulante vegetal	9
Efecto de los bioestimulantes en diferentes vías de aplicación	11
Vía foliar	11
Vía drench (aplicación al suelo)	11
MATERIALES Y MÉTODOS	13
Establecimiento y Ubicación	13
Material Vegetal	13
Manejo del Cultivo	13
Manejo Nutricional	14
Fuentes de Bioestimulantes	15

Diseño Experimental	15
Variables Evaluadas	16
Análisis Estadístico	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
Biomasa Fresca y Seca	22
Rendimiento	28
Calidad de Fruto	31
Pigmentos fotosintéticos	37
CONCLUSIONES	44
BIBLIOGRAFIA	45

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Fuentes utilizadas para la preparación de la solución nutritiva Steiner (1961).	14
Cuadro 2. Tratamiento y forma de aplicación evaluadas	16
Cuadro 3. Comparación de medias de variables agronómicas de plantas de pepino (<i>Cucumis sativa</i> L.) tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.	23
Cuadro 4. Comparación de medias de variables de calidad de frutos de pepino (<i>Cucumis sativa</i> L.), tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.....	33
Cuadro 5. Comparación de medias de variables de pigmentos fotosintéticos en hojas y frutos de pepino (<i>Cucumis sativa</i> L.), tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Morfología de las nanopartículas de óxido de Zinc (NPZnO)..... 15
- Figura 2.** Peso fresco aéreo (PFA, 2A) y Peso seco aéreo (PSA, 2B) de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). 26
- Figura 3.** Peso fresco (PFR, 3A) y seco (PSR, 3B) de raíz de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). 28
- Figura 4.** Numero de frutos (NF, 4A), peso de fruto (PF, 4B), diámetro polar del fruto (DPF, 4C) y diámetro ecuatorial del fruto (DEF, 4D) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). 31
- Figura 5.** Firmeza (F) de frutos de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). 35
- Figura 6.** Luminosidad (6A) y pureza (b^*) (6B) de frutos de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). 37
- Figura 8.** Clorofila b en fruto (9A) y hoja (9B) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$). 41
- Figura 9.** Clorofila total en fruto (9C) y hoja (9B) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$). 43

RESUMEN

EFFECTO DE MALTODEXTRINA Y NANOPARTICULAS DE OXIDO DE ZINC
SOBRE BIOMASA Y RENDIMIENTO EN PEPINO

POR

OMAR UCAN TUCUCH
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALONSO MÉNDEZ LÓPEZ
(ASESOR)

Saltillo, Coahuila

Julio 2021

El cambio climático y el crecimiento poblacional demandan la búsqueda de nuevas y novedosas alternativas para mejorar el crecimiento y la producción de cultivos basados en un sistema de agricultura sustentable. El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto bioestimulante de maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc sobre la biomasa y parámetros del rendimiento de pepino. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 5X2, con ocho repeticiones. Los tratamientos consistieron en cuatro bioestimulantes y un tratamiento control y dos vías de aplicación (foliar y drench). Los bioestimulantes evaluados fueron maltodextrina pura, maltodextrina refinada, nanopartículas de óxido de zinc solas y recubiertas con maltodextrina, aplicados a 1000 ppm. Se midieron variables de peso fresco y seco aéreo, peso fresco y seco de raíz, número, peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial de fruto. Los resultados indican que la maltodextrina pura y refinada aumentaron el peso seco aéreo un 26.74% y 23.30% respectivamente cuando se aplicaron vía foliar. Además, la aplicación de maltodextrina vía foliar incrementó el número de frutos en un 31.56%, mientras que las nanopartículas de óxido de zinc vía drench un 32.39%. La vía de aplicación de los bioestimulantes tuvo un impacto significativo en el peso seco aéreo, número de frutos, diámetro polar del fruto y diámetro ecuatorial del fruto. Tanto la maltodextrina como las nanopartículas de óxido de zinc, en ambas presentaciones, mostraron efectos bioestimulantes positivos en la biomasa y calidad de los frutos de pepino.

Palabras clave: bioestimulantes; nanopartículas; pepino; polisacáridos; rendimiento

ABSTRACT

EFFECT OF MALTODEXTRIN AND ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON
BIOMASS AND YIELD IN CUCUMBER

BY

OMAR UCAN TUCUCH
MÁSTER IN SCIENCE IN HORTICULTURE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALONSO MÉNDEZ LÓPEZ
(ADVISER)

Saltillo, Coahuila

Julio 2023

Climate change and population growth demand the search for new and innovative alternatives to improve the growth and production of crops based on a sustainable agriculture system. The aim of this work was to study the biostimulant effect of maltodextrin and zinc oxide nanoparticles on biomass and yield parameters of cucumber. The experiment was established under a randomized complete block design with a 5X2 factorial arrangement, with eight repetitions. The treatments consisted of four biostimulants and a control treatment and two application routes (foliar and drench). The biostimulants evaluated were pure maltodextrin, refined maltodextrin, zinc oxide nanoparticles alone and coated with maltodextrin, applied at 1000 ppm. Variables of fresh and dry aerial weight, fresh and dry root weight, number, weight, polar diameter and equatorial diameter of the fruit were measured. The results indicate that pure and refined maltodextrin increased aerial dry weight by 26.74% and 23.30%, respectively, when applied by foliar application. In addition, the application of maltodextrin via foliar increased the number of fruits by 31.56%, while the zinc oxide nanoparticles via drench by 32.39%. The route of application of the biostimulants had a significant impact on the aerial dry weight, number of fruits, polar diameter of the fruit and equatorial diameter of the fruit. Both maltodextrin and zinc oxide nanoparticles, in both presentations, showed positive biostimulant effects on the biomass and quality of cucumber fruits.

Key words: biostimulants; nanoparticles; cucumber; polysaccharides; performance

INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta diferentes desafíos que amenazan la sostenibilidad de la producción de alimentos: el cambio climático, el aumento de la población (Seppelt *et al.*, 2022). Factores bióticos como plagas y enfermedades que afectan los rendimientos (Dresselhaus y Hückelhoven, 2018). Además de factores abióticos como temperaturas extremas, salinidad e inundaciones (Singh, 2016; Dresselhaus y Hückelhoven, 2018; Kerchev *et al.*, 2020). Aunado a la creciente demanda del consumidor por alimentos libres de agroquímicos y con un aporte nutricional elevado (Gatti *et al.*, 2022; Mirzabaev *et al.*, 2023).

La nanotecnología es de las innovaciones científicas que se ha explorado nuevas áreas en la investigación, la de mayor alcance es la agricultura de alta tecnología (Hossain *et al.*, 2020). La aplicación de la nanotecnología en la agricultura procura encontrar métodos sostenibles para mejorar la eficiencia y sustentabilidad de las prácticas agrícolas al estimular efectos metabólicos de interés en la planta que se reflejan en una mayor producción, resistencia a sequía, salinidad y enfermedades (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Se ha señalado que las nanopartículas de óxido de zinc mejoran el crecimiento y rendimiento de las plantas (González-García *et al.*, 2021; Méndez-López *et al.*, 2022) y mejoran la calidad de los frutos al incrementar la concentración de azúcar (Zhao *et al.*, 2013), no obstante que algunos reportes indican un efecto opuesto, ya que se ha consignado un efecto fitotóxico en diferentes plantas cultivadas (Hou *et al.*, 2018). En algunas investigaciones con el uso de nanopartículas se ha reportado que éstas promueven el incremento en el rendimiento y mejoran algunas características agronómicas como biomasa fresca y seca, volumen de raíz, entre otros (Chanu-Thounaojam *et al.*, 2021; Méndez-López *et al.*, 2022).

La maltodextrina es un polisacárido derivado de la hidrólisis del almidón que se usa en múltiples áreas de la industria (Yang *et al.*, 2022). Algunos estudios han

demostrado un efecto estimulante de la maltodextrina en los cultivos de tomate y lechuga, en los que promovieron diferentes parámetros agronómicos de importancia como la altura de la planta, rendimiento y biomasa fresca (Pérez-Velasco *et al.*, 2020).

El pepino, es una hortaliza que se cultiva prácticamente en todo el mundo e incluso en invernaderos. En los países con clima templado durante el invierno, se cotiza a un alto precio. A nivel mundial, China es el principal referente de producción de esta hortaliza; por su parte, México ocupa el quinto lugar en volumen de producción de pepino; los estados de Sinaloa, Sonora y Michoacán son los principales productores del país en esta hortaliza (SIAP, 2022).

Con base en el contexto anterior, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto bioestimulante de la maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en el contenido de biomasa y el rendimiento en plantas de pepino bajo condiciones de invernadero.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto estimulante de la maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc sobre caracteres vegetativos, reproductivos y de calidad de frutos en pepino.

Objetivos específicos

- Evaluar la acción estimulante en relación con el desarrollo de las plantas de pepino.

- Comparar los efectos de los métodos de aplicación de maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc, vía suelo y vía foliar sobre el crecimiento y calidad de frutos de pepino.
- Determinar el efecto de la maltodextrina y las nanopartículas de óxido de zinc sobre la pigmentación fotosintética y la productividad antioxidante en frutos de pepino.

Hipótesis

La aplicación de maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc inducirá un desarrollo vigoroso de las plantas, mayor cantidad de antioxidantes, así como mayor producción y calidad de frutos en el cultivo de pepino.

REVISIÓN DE LITERATURA

La Nanotecnología

La nanotecnología es un campo interdisciplinario de la ciencia y la tecnología que se enfoca en la manipulación y control de la materia a escala nanométrica, es decir, a nivel de átomos y moléculas (Neme *et al.*, 2021). Esta área de investigación ha experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas debido a su gran potencial para revolucionar diversos sectores, como la medicina, la electrónica, la energía, la industria y la agricultura de esta manera, a través de la nanotecnología, los científicos logran diseñar y fabricar materiales y dispositivos con propiedades y características únicas, al aprovechar sus cualidades especiales que surgen a escala nanométrica (Subramani *et al.*, 2019).

La nanotecnología en el sector agrícola

La nanotecnología ha demostrado tener un gran potencial en el sector agrícola, ofrece diversas aplicaciones que mejoran la producción de cultivos, reducen el uso de agroquímicos y aumentan la calidad de los alimentos (Saritha *et al.*, 2022).

En la agricultura, se han desarrollado nanopartículas que encapsulan y liberan nutrientes de manera controlada, lo que permite más eficiencia de los fertilizantes en las plantas (Vejan *et al.*, 2021). Esto ayuda a reducir la cantidad de fertilizantes necesarios y evita la lixiviación de nutrientes al suelo, y con ello disminuir el impacto ambiental que ocasiona la agricultura convencional (Rakhimol *et al.*, 2021). También son utilizadas para encapsular y liberar los plaguicidas de manera controlada (Sinha *et al.*, 2017). Esto permite una liberación gradual y dirigida de estos productos, lo que reduce su cantidad y minimiza los efectos negativos en el ambiente y la salud humana (Zhang y Goss *et al.*, 2022).

Dentro de las aplicaciones de las nanopartículas en la agricultura, se reporta que favorecen en la detección y eliminación de contaminantes y la protección de cultivos (Anand *et al.*, 2020; Khan *et al.*, 2021; Guleria *et al.*, 2022).

Los sensores nanotecnológicos son altamente sensibles para detectar y monitorear contaminantes en los cultivos, como plaguicidas, metales pesados o patógenos (Anand *et al.*, 2020). Las nanopartículas ayudan a remover estos contaminantes del agua y el suelo, y contribuyen a la descontaminación de los cultivos y el entorno agrícola (Khan *et al.*, 2021).

Las nanopartículas también se han utilizado en la creación de recubrimientos protectores para las semillas y los cultivos, ya que proporcionan una barrera física contra plagas, enfermedades y condiciones adversas; de esta manera estos recubrimientos liberan lentamente compuestos bioactivos, como agentes antimicrobianos o fitohormonas, que ayudan a proteger y promover el crecimiento saludable de las plantas (Guleria *et al.*, 2022).

Bioestimulación Vegetal

Un bioestimulante es una sustancia o microorganismo que se utiliza en la agricultura para mejorar el crecimiento, desarrollo y calidad de las plantas (Kaur *et al.*, 2021). Estos productos estimulan los procesos fisiológicos de las plantas, lo que les permite adaptarse mejor a situaciones de estrés abiótico como la sequía, el frío, el calor intenso y el exceso de salinidad, entre otros (Vanajothi *et al.*, 2022).

Los bioestimulantes no son fertilizantes en sí mismos, ya que no aportan nutrientes esenciales a las plantas. En cambio, contienen sustancias naturales, como aminoácidos, péptidos, ácidos húmicos y fúlvicos, fitohormonas, extractos de algas y microorganismos beneficiosos, que actúan como señales para activar los mecanismos de defensa y respuesta de las plantas (Sardrodi *et al.*, 2022).

Los bioestimulantes mejoran la germinación de semillas, aumentan el enraizamiento, promueven el crecimiento vegetativo, mejoran la floración y fructificación, aumentan la resistencia a enfermedades y plagas, y mejoran la eficiencia en el uso de los nutrientes. También les facilitan a las plantas a recuperarse más rápido después de situaciones de estrés, debido a sus mecanismos y modos de acción en las que actúan en las plantas (Gupta *et al.*, 2021).

Nanopartículas de óxido de zinc

Las nanopartículas de óxido de zinc, son partículas extremadamente pequeñas de óxido de zinc (ZnO) que tienen dimensiones en la escala de los nanómetros (1 nanómetro = 1×10^{-9} metros) (Khan *et al.*, 2023). El óxido de zinc es un compuesto químico formado por átomos de zinc (Zn) y oxígeno (O), y se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones, por a sus propiedades únicas (Awasthi, 2021).

Las nanopartículas de óxido de zinc tienen propiedades diferentes a las del óxido de zinc en forma macroscópica, por el tamaño reducido que tienen; no obstante, presentan una gran área de superficie en comparación con su volumen, lo que les confiere propiedades físicas, químicas y ópticas distintas (Awasthi, 2021). En este contexto las nanopartículas de óxido de zinc han demostrado tener propiedades antibacterianas, característica que las hace útiles en aplicaciones como recubrimientos antimicrobianos para superficies y materiales médicos (Mani *et al.*, 2022).

Usos de las nanopartículas de óxido de zinc

Se utilizan en la fabricación de filtros solares o protectores solares, por su capacidad para absorber y dispersar la radiación ultravioleta (UV), éstas

partículas, por tanto, pueden ayudar a proteger la piel de los efectos dañinos de la radiación UV (Khan *et al.*, 2023).

Las nanopartículas de óxido de zinc tienen un uso en la electrónica, ya que se utilizan en la fabricación de dispositivos electrónicos, como transistores de película delgada y sensores, debido a sus propiedades semiconductoras (Saleem *et al.*, 2022).

Actúan como catalizadores en una reacción fotoquímica, es decir fotocatalisis que convierte la energía solar en energía química, en el caso específico, las nanopartículas de óxido de zinc actúan en reacciones químicas cuando se exponen a la luz ultravioleta. Esto tiene aplicaciones potenciales en la descomposición de contaminantes orgánicos y en la purificación del agua (Sarathi *et al.*, 2022).

Función del zinc en las plantas

El zinc desempeña varias funciones importantes en los procesos metabólicos de las plantas. A continuación, se mencionan algunas de estas:

Activador enzimático: el zinc es un componente esencial de muchas enzimas involucradas en reacciones bioquímicas clave en las plantas. Estas enzimas catalizan una variedad de procesos metabólicos, que incluyen la síntesis de proteínas, la división celular, la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de hormonas vegetales (Castillo-Gonzales *et al.*, 2018).

Formación de clorofila: el zinc desempeña un papel importante en la síntesis de clorofila, el pigmento verde responsable de la fotosíntesis. La clorofila captura la energía de la luz solar y la convierte en energía química utilizada por las plantas para crecer y desarrollarse (Beale, 2009).

Metabolismo de carbohidratos: participa en el metabolismo de los carbohidratos y ayuda en la síntesis y degradación de almidón y azúcares en las plantas (Sharma *et al.*, 2021).

Regulación del crecimiento: el zinc regula el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como en la división celular, la elongación de los tallos y raíces, y la formación de tejidos vegetales (Yamuangmorn *et al.*, 2022).

Resistencia a enfermedades y estrés: desempeña un papel importante en la respuesta de defensa de las plantas contra patógenos y el estrés abiótico. Favorece la activación en la producción de fitoalexinas y antioxidantes en las plantas cuando éstas se exponen a estrés (Kavian *et al.*, 2022).

Las nanopartículas de óxido de zinc como bioestimulantes vegetales

Cuando las nanopartículas de óxido de zinc son aplicadas en las plantas, penetran en los tejidos vegetales y tienen interacciones a nivel celular. Se ha sugerido que estas nanopartículas participan en las señales moleculares, desencadenando respuestas en las plantas que promueven su crecimiento y resistencia frente a diversos factores de estrés (Prakash *et al.*, 2022).

Algunos estudios han encontrado que las nanopartículas de óxido de zinc mejoran la germinación de las semillas, aumentar la longitud de la raíz y estimular la actividad enzimática en las plantas (Sharma *et al.*, 2021). Además, se ha observado que estas nanopartículas influyen positivamente en la fotosíntesis y en la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Rao, 2023).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que aún hay debate y controversia sobre el uso de nanopartículas en la agricultura. Algunos estudios han sugerido posibles efectos negativos, como la acumulación de nanopartículas en los suelos y su impacto en los microorganismos (Singh *et al.*, 2022). Además, los efectos a

largo plazo de la exposición a nanopartículas en el ambiente y en la salud humana todavía no están completamente comprendidos (Chauhan, 2023).

Maltodextrina

La maltodextrina es un carbohidrato complejo que se utiliza comúnmente como aditivo alimentario. Se produce a partir del almidón, ya sea de maíz, trigo, papa o arroz, mediante un proceso de hidrólisis enzimática (Bhattacharya, 2022).

La maltodextrina se presenta como un polvo blanco o ligeramente amarillento, y tiene un sabor suave y ligeramente dulce. Debido a su estructura química, se digiere rápidamente en el organismo y se convierte en glucosa para proporcionar energía de manera rápida (Kong *et al.*, 2021).

En la industria alimentaria, la maltodextrina se utiliza como espesante, estabilizador, agente de textura y edulcorante. Se agrega a una amplia variedad de productos como bebidas deportivas, alimentos para bebés, productos horneados, postres, sopas instantáneas, aderezos para ensaladas y productos en polvo como sustitutos de comidas (Li *et al.*, 2022).

Además de su uso en la industria alimentaria, la maltodextrina también se utiliza en la industria farmacéutica y en productos para el cuidado personal, además es importante tener en cuenta que es un carbohidrato de rápida absorción y tiene un alto índice glucémico, lo que significa que puede elevar rápidamente los niveles de azúcar en la sangre (Metawea *et al.*, 2023)

Modo de acción de la maltodextrina como bioestimulante vegetal

Como bioestimulante vegetal, la maltodextrina genera varios efectos positivos en las plantas. Mejora el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que proporciona

una fuente de energía fácilmente asimilable, lo que impulsa su crecimiento y desarrollo (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Al proporcionar un suministro adicional de carbohidratos, la maltodextrina estimula la producción de biomasa en las plantas, por lo que resulta en un aumento de la producción en los cultivos; también bajo este mismo contexto se ha observado que la aplicación de maltodextrina ayuda a las plantas a resistir mejor el estrés abiótico, como la sequía, las altas temperaturas o la salinidad del suelo (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Mejora la absorción de nutrientes por parte de las plantas, al actuar como un agente quelante, forma complejos con los minerales presentes en el suelo y facilita su disponibilidad para las raíces (Gemin *et al.*, 2023).

Mejora la resistencia ante el estrés, ya que las plantas a menudo experimentan estrés debido a condiciones ambientales adversas, como sequía, salinidad, cambios de temperatura o ataques de patógenos, por tanto, la aplicación de maltodextrina mejora en las plantas su resistencia a estos tipos de estrés. Actúa también, como un agente osmoprotector, es decir, que protege las células vegetales contra el daño causado por la deshidratación o exposición a altas concentraciones de sal (Khan *et al.*, 2023).

La maltodextrina es una fuente rápida de carbohidratos a las plantas, lo que favorece la estimulación del metabolismo y aumenta la producción de energía, (Smrčková *et al.*, 2013); por lo que, al suministrar estas de forma externa, como energía adicional, se promueve la síntesis de compuestos vitales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, como proteínas, ácidos nucleicos y fitohormonas.

Efecto de los bioestimulantes en diferentes vías de aplicación

La aplicación de bioestimulantes tanto vía foliar como vía drench puede tener varios efectos beneficiosos en las plantas.

Vía foliar

Los bioestimulantes promueven la producción de hormonas vegetales, como las auxinas, giberelinas y citoquininas, que estimulan el crecimiento de las hojas, tallos y raíces. También mejoran la actividad fotosintética y aumentan la producción de energía y nutrientes, lo que se traduce en un mejor desarrollo de la planta (Yaseen y Takacs-Hajos, 2022; Vanajothi *et al.*, 2022). También ayudan a las plantas a tolerar mejores condiciones adversas como sequías, salinidad, temperaturas extremas y falta de nutrientes, lo que favorece su sistema antioxidante y mejora su capacidad para adaptarse a dichas condiciones (Juarez-Maldonado *et al.*, 2019).

Al aplicar bioestimulantes vía foliar, se puede mejorar los mecanismos de absorción de nutrientes por parte de las plantas, lo que resulta en una mejor nutrición y mayor rendimiento (Al-Karaki *et al.*, 2023).

Vía drench (aplicación al suelo)

Los bioestimulantes proporcionan una estimulación del sistema radicular cuando éstos son aplicados al suelo, por lo que promueven el desarrollo de un sistema radicular más abundante y vigoroso, lo que mejora la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas (Mofokeng *et al.*, 2021).

Aumentan la disponibilidad de nutrientes, al interactuar con los microorganismos beneficiosos del suelo, al descomponer los nutrientes orgánicos y mejorar su disponibilidad para las plantas.

Los bioestimulantes incrementan la resistencia a enfermedades, al fortalecer el sistema inmunológico de las plantas, aplicados al suelo pueden aumentar su resistencia a enfermedades causadas por hongos, bacterias u otros patógenos del suelo.

Estimulan la actividad microbiana del suelo, ya que algunos bioestimulantes promueven el crecimiento y la actividad de microorganismos benéficos en el suelo, mejorando la salud general del suelo y su capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas (Suchithra *et al.*2022).

Es importante destacar que los efectos específicos de los bioestimulantes varían según el producto utilizado, la dosis aplicada, la especie vegetal y las condiciones ambientales. Siempre es recomendable seguir las instrucciones del fabricante y realizar pruebas o consultas con expertos antes de aplicar cualquier producto en tus cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento y Ubicación

El estudio se desarrolló en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno, acondicionado con pared húmeda y ventilación por medio de extractores, perteneciente a la Dirección de Investigación, ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México; geográficamente se encuentra ubicada a 25°21'22.51" de latitud norte y 101°2'9.88" longitud oeste, con una altitud de 1760 msnm.

Material Vegetal

El material vegetal utilizado fue pepino *Cucumis sativa* L. tipo americano híbrido Centauro F1, de la empresa Harris Moran®. El cual es un pepino de crecimiento indeterminado apto para ser cultivado en invernadero ya que combina calidad, rendimiento y vigor de planta. Sus frutos son uniformes en tamaño y forma.

Manejo del Cultivo

La siembra se realizó en bolsas de polietileno negro con capacidad de 10 L, estas fueron llenadas con una mezcla de sustrato de peat moss + perlita a una relación 1:1 (v/v). La siembra se hizo de forma directa colocando una semilla por maceta.

La nutrición del cultivo se hizo con la solución nutritiva Steiner (1961) dosificada de acuerdo con la etapa de crecimiento y demanda de la planta. Las plantas se manejaron a un solo tallo con tutorado tipo holandés; el cultivo se mantuvo por 100 días para posteriormente cortar las plantas.

Manejo Nutricional

La dosificación de la solución nutritiva aplicada al cultivo fue al 50% de la concentración al inicio del crecimiento de la plántula y hasta los 15 días después de la emergencia (DDE), después se ajustó la dosis de la solución nutritiva al 75% por los 15 días posteriores y a los 30 DDE se manejó la solución nutritiva al 100% hasta el final del cultivo (Cuadro 1). Para la preparación de la solución nutritiva se utilizó un contenedor con capacidad de 1,100 L, la solución nutritiva se suministró por medio de un sistema de riego localizado por espaguete, posterior a esto durante el cuajado de frutos se añadió 1.0 g de nitrato de calcio suplementario vía foliar para evitar el problema de pudrición apical en fruto y planta (blossom).

Cuadro 1. Fuentes utilizadas para la preparación de la solución nutritiva Steiner (1961).

Fuente	Concentración (volumen final de 1,000 L)		
	50%	75%	100%
Nitrato de calcio	250.8 g	376.2 g	501.7 g
Nitrato de potasio	177.9 g	266.8 g	355.8 g
Sulfato de potasio	151.1 g	226.7 g	302.3 g
Sulfato de magnesio	98.5 g	147.8 g	197.1 g
Micro Mix	40.0 g	60.0 g	80.0 g
Ácido nítrico	105.0 mL	157.5 mL	210.0 mL
Ácido fosfórico	41.5 mL	62.2 mL	83.0 mL

Fuentes de Bioestimulantes

La maltodextrina y las NPZnO fueron sintetizadas por medio del método de precipitación química (Hsieh, 2007), en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) ubicada en Saltillo, Coahuila, México. Estas nanopartículas tenían una morfología semi esférica con nanométrica de aproximadamente 50 nm (Figura 1).

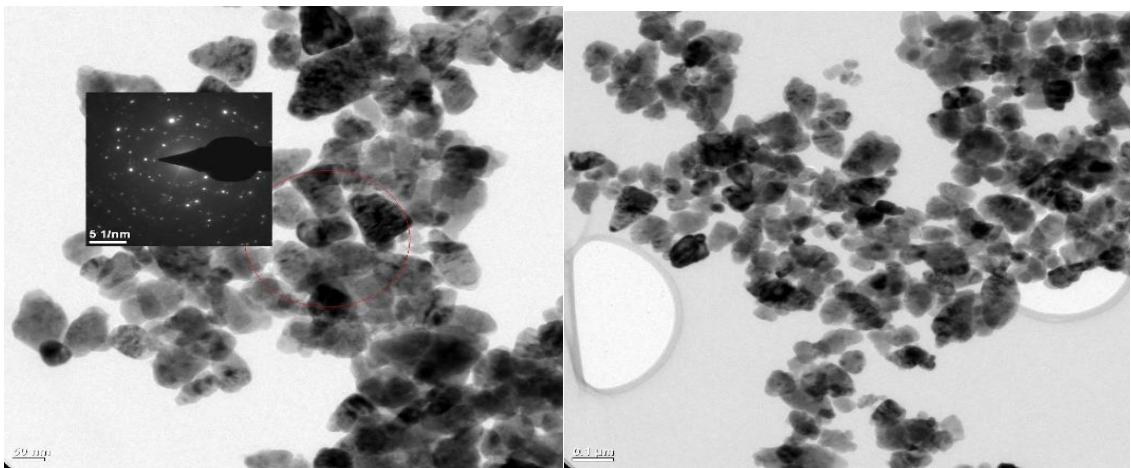


Figura 1. Morfología de las nanopartículas de óxido de Zinc (NPZnO)

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 5x2, con un total de 10 tratamientos y ocho repeticiones cada uno, la unidad experimental fue una maceta con una planta. La densidad de plantación fue de 2.8 plantas·m⁻². Las aplicaciones de los tratamientos se iniciaron a los 15 días después de la emergencia y posteriormente cada 15 días hasta completar cinco aplicaciones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamiento y forma de aplicación evaluadas

No.	Tratamientos	vía
1	Control (T0)	Drench
2	Control (T0)	Foliar
3	Maltodextrina pura (MDP) a 1,000 ppm	Drench
4	Maltodextrina refinada (MDX) a 1,000 ppm	Drench
5	NPZnO a 1,000 ppm	Drench
6	NPZnO recubiertas con maltodextrina (NPZnO-MDX) a 1,000 ppm	Drench
7	Maltodextrina pura (MDP) a 1,000 ppm	Foliar
8	Maltodextrina refinada (MDX) a 1,000 ppm	Foliar
9	NPZnO a 1,000 ppm	Foliar
10	NPZnO recubiertas con maltodextrina (NPZnO-MDX) a 1, 000 ppm	Foliar

Variables Evaluadas

Biomasa fresca y seca

Al finalizar el periodo de evaluación y haber transcurrido 100 días después de la emergencia, se hizo un muestreo destructivo de las plantas para obtener las mediciones de biomasa fresca y seca aérea, así como peso fresco y seco de la raíz. Para ello, se procedió a pesar el material vegetativo fresco de la parte aérea (hojas y tallo). En cuanto al peso fresco de raíz, primeramente, se llevó a cabo un proceso de lavado de raíz para retirar el exceso de sustrato, posteriormente se pesó cada raíz de manera individual. Tanto las muestras de biomasa aérea como de raíz se sometieron a un proceso de secado en una estufa a una temperatura constante de 65°C por 48 h. Transcurrido este tiempo, se tomó el registro del peso seco con una balanza analítica en ambos casos.

Determinación de variables de rendimiento de fruto

Durante la cosecha, los frutos obtenidos fueron trasladados al laboratorio. Ahí se tomó registro del peso en gramos (g) con una balanza analítica, se registró el diámetro polar (cm) con un flexómetro, y el grosor (mm) con un vernier digital de cada uno de los frutos de pepino cosechados por planta.

Calidad de fruto

Se realizaron las mediciones de calidad del fruto en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Botánica de la UAAAN. Las variables de calidad del fruto se evaluaron de acuerdo con los criterios establecidos por A.O.C.A. (2000) y Padayatty (2001). Se seleccionaron tres repeticiones por tratamiento y de cada tratamiento se tomaron tres frutos para llevar a cabo las mediciones correspondientes.

Firmeza (F): la firmeza se determinó con el apoyo de un penetrómetro digital (PCE-PTR 200, grupo PCE, Albacete, castilla la mancha, España), equipo con una punta de 8.0 mm. Los resultados se obtuvieron en $\text{Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ con tres lecturas por cada fruto.

Color: se evaluaron los parámetros de color Ciel L, a*y b* por el método Cie L a b, para lo cual se empleó un equipo Minolta Chroma MeterCR-400 (MinoltaCorp, Ramsey, Nuevo Jersey, EE. UU.). El medidor L se refiere a la luminosidad, a al tono y b la pureza. Estos parámetros físicos determinan el color visible y la apreciación del producto comercial.

Sólidos solubles totales (SST): para determinar los sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) de los pepinos, se siguió la metodología sugerida por la AOAC (1994). Se tomaron tres frutas de cada tratamiento y se extrajo el jugo, al cual se le midió la cantidad de sólidos solubles totales a temperatura ambiente (20°C) se usó un

refractómetro marca ATAGO. La concentración se expresó como porcentaje en la escala de °Brix.

pH y conductividad eléctrica (C.E.): la medición de esta variable se llevó a cabo con un potenciómetro de la marca HANNA, modelo H198130. Se preparó un extracto de frutos macerados y se midió el pH y la conductividad eléctrica (CE) del extracto.

ORP: el potencial óxido reducción se determinó después de obtener el extracto de pulpa de fruto y se midió con un equipo ORP medidor redox marca Gain Express.

Acidez titulable (AT): esta variable se determinó de acuerdo con el método del AOAC (2000), para lo cual, se extrajo el jugo de tres frutos de pepino por cada tratamiento, se diluyeron 10 mL de jugo de pepino en 125 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Se tomó una muestra de 10 mL y en esta se hizo la titulación con NaOH 0.01 N a pH 8.3. Se registraron cuatro lecturas por cada tratamiento y los datos de estas mediciones se expresaron en porcentaje de ácido cítrico por medio de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\%acidez = VNaOH * NNaOH * meqacido * 100/v$$

Dónde:

VNaOH= Volumen de NaOH que se utilizó para la titulación.

NNaOH= Normalidad del NaOH

Meq ácido= Miliequivalentes de ácido.

El valor equivalente de base a ácido para el ácido cítrico es: 0.064.

V= Peso en g o volumen de la muestra en mL.

Vitamina C (Vit C): la vitamina C se determinó mediante el método del 2,6-dicloroindofenol por titulación. Para esto el reactivo de Thielman se preparó de

acuerdo con la AOAC 967.21. Se utilizó una muestra de 20 g, la cual fue puesta en un mortero de porcelana para su molienda y se le añadió 10 mL de HCL al 2% y aforó con 100 mL de agua destilada, posteriormente se filtró en un matraz Erlenmeyer, se tomó el volumen total del filtrado, después se tomó una alícuota de 10 mL y se pasó a titular con el reactivo de Thielman hasta que viró a un color rosado pálido sin desaparecer durante 30 segundos. Para el registro de la lectura se consideró los mL gastados del reactivo. Para calcular el contenido de ácido ascórbico en las muestras se realizó una curva de calibración, con una solución patrón de ácido ascórbico según la A.O.A.C. 967.21. La concentración de la vitamina C en la muestra, se calculó según la fórmula:

$$\text{Vitamina C} = VRT * 0.088 * VT * 100/VA * P$$

Donde:

Vitamina C= En la muestra expresada en mg en 100 g.

VRT= Volumen gastado en mL de reactivo de Thielman.

0.088= mg de ácido ascórbico equivalente a un mL del reactivo de Thielman.

VT= Volumen total en mL del filtrado total de vitamina C en HCl.

VA= Volumen en mL de la alícuota valorada.

P= Peso de muestra en gramos

Pigmentos fotosintéticos

En miligramos por gramo ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), para determinar la clorofila a en hoja (Clah) y clorofila a en fruto (Claf) se llevó a cabo la siguiente metodología, se pesó 1.0 g de muestra y en un mortero frío se trituró, posteriormente se añadieron 40 mL de acetona al 90% y 0.5 g de Carbonato de Magnesio (MgCO_3). Se depositó en un matraz Erlenmeyer de 125 mL cubriéndolo con papel aluminio para dejarlo reposar durante 24 horas en refrigeración para extracción completa. Pasado el periodo de reposo, con ayuda de una gasa y un matraz volumétrico de 100 mL se filtró la muestra y se lavó el residuo con 60 mL de acetona al 90%, se tomaron

alícuotas para depositar en tubos Eppendorf, los cuales se centrifugaron, posteriormente se realizaron las lecturas correspondientes a 642.5 nm y 660 nm en un espectrofotómetro marca Velab modelo VE-5600UV, con tres lecturas por repetición y cuatro repeticiones por tratamiento. La concentración de Clah y Claf presente en la muestra, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Clorofila a (mg /g)} = (9.93 * A_{660 \text{ nm}}) - (0.777 * A_{642.5 \text{ nm}}) / 10 * P$$

Dónde:

A= Absorbancia.

P= Peso de la muestra en g.

Subíndices (642.5 nm y 660 nm) = Longitud de onda.

Para la determinación de la variable clorofila b en hoja (Clbh) y clorofila b en fruto (Clbf), se llevó a cabo la metodología descrita anteriormente, como unidad de medida se usó miligramos por gramo. La concentración de clorofila b presente en la muestra, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Clorofila b (mg g}^{-1}\text{)} = (17.6 * A_{642.5\text{nm}}) - (2.81 * A_{660\text{nm}}) 10 * P$$

Dónde:

A= Absorbancia.

P= Peso de la muestra en g.

Subíndices (642.5 nm y 660 nm) = Longitud de onda

La variable clorofila total en hoja se expresó en miligramos por gramo, la lectura se determinó mediante la metodología descrita para la clorofila a. La concentración de clorofila total presente en la muestra, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Clorofila total (mg /g)} = (7.12 * A_{660 \text{ nm}}) + (16.8 * A_{642.5 \text{ nm}}) 10 * P$$

Dónde:

A= Absorbancia.

P= Peso de la muestra en g.

Subíndices (642.5 nm y 660 nm) = Longitud de onda

Análisis Estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de LSC de Fisher ($p \leq 0.05$). Se utilizó el paquete estadístico InfoStat versión 2021. Para la elaboración de las figuras se utilizó el programa gráfico SigmaPlot 14.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa Fresca y Seca

La maltodextrina y las nanopartículas afectaron significativamente las variables de peso de la parte aérea y de raíz, así como los parámetros de rendimiento de fruto; mientras que, la vía de aplicación de los bioestimulantes sólo tuvo efecto significativo en el DPF; en tanto que, la interacción de los factores en estudio afectó de forma significativa a las variables PSA, NF, DPF y DEF (Cuadro 3).

El peso seco aéreo (PSA), mostró un aumento significativo en todos los productos evaluados comparados con el T0; en tanto que, la vía de aplicación no presentó diferencias estadísticas significativas en este parámetro (Cuadro 3). Además, se observó incremento significativo en el PSA de las plantas de pepino (*Cucumis sativa* L.) tratadas con maltodextrina y nanopartículas en interacción con la vía de aplicación.

El peso fresco de raíz (PFR), mostró una disminución de los valores con la aplicación de NPZnO a 1,000 ppm respecto al T0, mientras que el método de aplicación no afectó al PFR (Cuadro 3). Del mismo modo, la interacción de los bioestimulantes y la vía de aplicación no mostraron efectos estadísticamente diferentes a T0.

El peso seco de raíz (PSR), presentó los mejores valores con la aplicación de MDX, MDP y NPZnO-MDX, sin embargo, este parámetro no fue afectado significativamente por la vía de aplicación (Cuadro 3). En este parámetro no se observaron diferencias estadísticas entre la interacción de los factores.

Cuadro 3. Comparación de medias de variables agronómicas de plantas de pepino (*Cucumis sativa* L.) tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.

Tratamiento	PFA (g)	PSA (g)	PFR (g)	PSR (g)	NF	PF (g)	DPF (cm)	DEF (mm)
Bioestimulantes								
T0	442.88 ^c	65.78 ^b	59.00 ^{ab}	3.49 ^c	9.75 ^c	301.54 ^b	19.83 ^c	47.79 ^b
MDP	510.25 ^a	79.86 ^a	60.50 ^a	4.98 ^a	12.63 ^a	341.39 ^a	21.12 ^b	49.61 ^a
MDX	521.06 ^a	80.29 ^a	58.00 ^{ab}	4.50 ^{ab}	11.81 ^b	343.09 ^a	21.48 ^{ab}	50.15 ^a
NPZnO	457.19 ^{bc}	79.89 ^a	54.44 ^b	3.95 ^{bc}	11.06 ^b	352.05 ^a	21.79 ^a	50.21 ^a
NPZnO+MDX	479.06 ^b	79.52 ^a	61.63 ^a	4.46 ^{ab}	11.06 ^b	347.95 ^a	21.50 ^{ab}	50.38 ^a
ANOVA	0.0001	0.0001	0.0484	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Vía de aplicación								
Foliar	479.88 ^a	76.60 ^a	59.38 ^a	4.40 ^a	11.10 ^a	333.08 ^a	20.97 ^b	49.62 ^a
Drench	484.30 ^a	77.14 ^a	58.05 ^a	4.15 ^a	11.43 ^a	341.33 ^a	21.32 ^a	49.63 ^a
ANOVA	0.5644	0.6678	0.4429	0.1862	0.1809	0.1619	0.0414	0.9589
Bioestimulantes*Vía de aplicación								
ANOVA	0.0575	0.0133	0.2054	0.2154	0.0036	0.1024	0.0001	0.0485
C.V %	7.08	7.32	13.07	19.47	9.54	7.73	3.58	3.27

T0= tratamiento control, MDP= maltodextrina pura, MDX= maltodextrina refinada, NPZnO= nanopartículas de óxido de zinc, NPZnO-MDX= nanopartículas de óxido de zinc recubiertas con maltodextrina, C.V = coeficiente de variación. Letras iguales no presentan diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

La variable de número de fruto (NF) tuvo los mejores valores cuando se aplicó MDP, seguido por MDX, NPZnO-MDX y NPZnO que fueron estadísticamente diferentes comparados con T0, en tanto que el método de aplicación no tuvo efecto significativo sobre el NF (Cuadro 3); además, en esta variable se observó una interacción significativa entre los factores evaluados.

El peso del fruto (PF) mostró efecto positivo significativo con la aplicación de los bioestimulantes evaluados comparado con el respectivo T0; en tanto que la vía de aplicación no tuvo diferencias estadísticas significativas en esta variable (Cuadro 3). De la misma manera, no se observaron diferencias significativas en la interacción de los factores.

La variable diámetro polar del fruto (DPF) obtuvo los mejores valores cuando se aplicó NPZnO, seguido de las NPZnO-MDX y MDX, no obstante que todos los tratamientos de bioestimulantes fueron superiores al T0; este parámetro, también fue afectado significativamente por la vía de aplicación, en ésta variable la aplicación vía drench promovió los mejores valores en comparación con la aplicación foliar (Cuadro 3). Del mismo modo, la combinación de los productos y la vía de aplicación mostraron interacción positiva con diferencias significativas en este parámetro.

El diámetro ecuatorial del fruto (DEF) mostró un aumento con la aplicación de los bioestimulantes evaluados en comparación con el T0; en tanto que la vía de aplicación no tuvo efecto estadísticamente diferente (Cuadro 3). Sin embargo, se observaron diferencias significativas en el DEF de pepino cuando las plantas fueron tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en interacción con la vía de aplicación.

Peso fresco y seco aéreo

Los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas independientemente de la vía de aplicación indujeron efecto significativo positivo sobre el PSA de las plantas (Figura 2A). En esta variable los tratamientos MDX y MDP mostraron un incremento del 18.44 y 15.97%, respectivamente, en la variable PSA de la planta, en ambos casos estos dos bioestimulantes mostraron el mismo comportamiento independientemente de la vía de aplicación foliar y drench comparado con el T0. El tratamiento NPZnO-MDX aplicado vía drench promovió un incremento de 15.25 % en el peso fresco aéreo comparado con el testigo correspondiente. Por otro lado, las NPZnO cuando fueron aplicadas vía drench también promovieron un incremento de 8.24% comparado con el T0 correspondiente. El PSA mostró efecto positivo con diferencias significativas en los tratamientos con maltodextrina

y nanopartículas en interacción con la vía de aplicación (Figura 2B). Este parámetro alcanzó los mejores resultados cuando las plantas fueron tratadas con MDP y MDX en aplicación vía foliar con un incremento de 26.74 y 23.30%, seguido por los tratamientos de NPZnO-MDX y NPZnO en aplicación foliar con un incremento de 21.10 y 14.11%, respectivamente, comparado con el T0 correspondiente (Figura 2B). Sin embargo, cuando la aplicación de los bioestimulantes se hizo por vía drench, el mejor efecto fue promovido por las NPZnO con un incremento de 25.68%, seguido por MDX, NPZnO-MDX y MDP con un incremento de hasta el 20% en comparación con el T0 correspondiente (Figura 2B).

Los nanofertilizantes, como las NPZnO, debido a su naturaleza permiten una liberación lenta y una absorción eficiente de nutrientes por parte de los cultivos (Elemike *et al.*, 2019), con ello se logra un mejor desarrollo de las plantas como se ha reportado en otros estudios (Pérez-Velasco *et al.*, 2020, Ghani *et al.*, 2022, Kaningini *et al.*, 2022). Así mismo, el efecto estimulante de las nanopartículas ha sido atribuido al hecho de tener cargas superficiales que interactúan con las células vegetales lo que induce una respuesta positiva en el crecimiento de la planta (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Por otro lado, la maltodextrina es un polisacárido derivado de la hidrólisis del almidón que se usa en múltiples áreas de la industria (Yang *et al.*, 2022), como en la microencapsulación de minerales (Lolodi, 2011). Pérez-Velasco *et al.* (2020) indicaron que las NPZnO recubiertas con maltodextrina mejoraron la altura de la planta, peso seco raíz y peso seco de tallo; así mismo, en esta investigación se reportó que al agregar maltodextrina sin NPZnO se observó un crecimiento y producción de biomasa de las plantas similar al obtenido con las NPZnO recubiertas con maltodextrina, por lo que, estos investigadores indicaron que la maltodextrina actúa como estimulante de plantas.

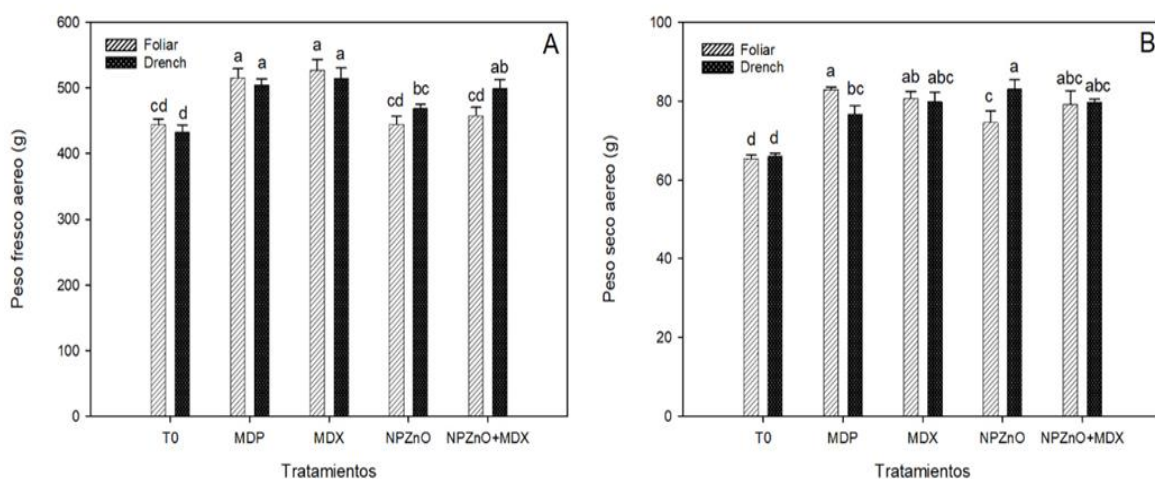


Figura 2. Peso fresco aéreo (PFA, 2A) y Peso seco aéreo (PSA, 2B) de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

Peso fresco y seco de la raíz

Para el PFR, la prueba de medias identificó diferencias estadísticas significativas en los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas en interacción con las vías de aplicación (Figura 3A). En este parámetro, el mejor efecto se observó con la aplicación de MDP seguido de NPZnO-MDX en ambos casos cuando se hizo por vía foliar, promovió un incremento de 10.38 y 9.52%, respectivamente, en comparación con el T0 correspondiente. Así también, se observó una disminución de 13.06% en el PFR cuando se aplicó NPZnO por vía drench en comparación con el T0 correspondiente (Figura 3A).

En la variable de PSR no se presentaron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas en interacción con las vías de aplicación (Figura 3B). No obstante, este parámetro presentó los mayores valores con la aplicación por vía foliar de MDP y NPZnO-MDX con un incremento de 45.78 y 39.04%, respectivamente, en comparación con el T0 correspondiente; también se observó un incremento en el PSR cuando se aplicó MDP y MDX por

vía drench con un aumento de 38.77 y 36.73%, respectivamente, contrastado con el T0 correspondiente (Figura 3B).

El poder bioestimulante de los polisacáridos, como la maltodextrina, se basa en la función elicitora al interactuar con las células vegetales, promoviendo una respuesta del sistema secundario vegetal, así como aporte directo de energía dada su composición de cadenas de azúcares esto ayuda a ser más eficiente el mecanismo fotosintético de fijación de carbono (Omoarelojie *et al.*, 2021). En este trabajo se observó que al aplicar MDP, MDX y NPZnO-MDX mejoró el PFA y PSR de las plantas de pepino, así como un mayor PSA al tratar las plantas con MDP, MDX, NPZnO y NPZnO-MDX comparado al obtenido en plantas no tratadas con éstos bioestimulantes, lo que reitera el efecto positivo de las nanopartículas y maltodextrina en el desarrollo de las plantas. Sin embargo, se observó que dentro de los bioestimulantes evaluados, las NPZnO presentaron una ligera reducción en la producción de biomasa de las plantas de pepino. En este sentido, se ha indicado que las NPZnO debido a su tamaño nanométrico presenta problemas de estabilidad y dispersión (Pérez-Velasco *et al.*, 2020), lo que podría afectar su eficiencia como nanofertilizantes. Este problema de las nanopartículas se reduce al utilizar un recubrimiento o encapsulado (Kolbert *et al.*, 2022). Lo anterior explica la menor producción de biomasa de las plantas de pepino (PFA, PFR y PSR) con las NPZnO comparado con las NPZnO-MDX. Dentro de la vía de aplicación de la maltodextrina, se observó que el PSA de las plantas de pepino fue similar en las dos vías de aplicación de MDX; en tanto que, al aplicar MDP el mayor PSA se obtuvo al aplicar este bioestimulante vía foliar. Por otro lado, al aplicar NPZnO se observó un mayor PSA al aplicar este bioestimulante vía drench. Estos resultados difieren con lo reportado por Pérez-Velasco *et al.*, (2020), quienes reportaron una mayor altura de planta, peso seco de tallo y peso seco de raíz al aplicar maltodextrina vía drench; mientras que, la vía de aplicación de las NPZnO fue similar en la aplicación vía foliar y drench. Relacionado a la diferencia en los resultados, González-Morales *et al.* (2022) señalan que efecto

positivo o negativo de los bioestimulantes vegetales dependerá de la especie vegetal, la concentración, características del bioestimulante y la vía de aplicación.

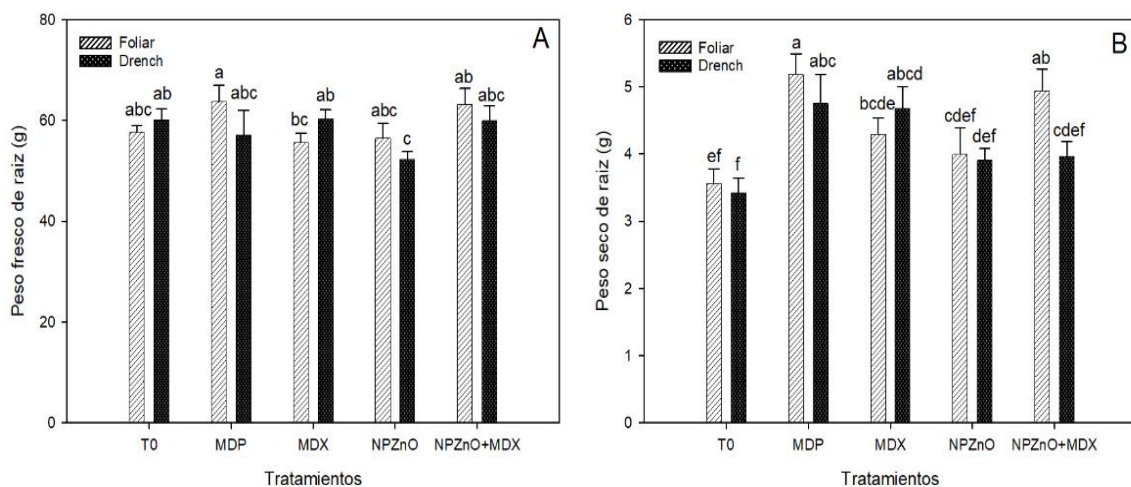


Figura 3. Peso fresco (PFR, 3A) y seco (PSR, 3B) de raíz de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

Rendimiento

Número y peso de frutos

El NF mostró diferencias significativas en los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas en interacción con la vía de aplicación (Figura 4A). La aplicación de MDP por vía foliar promovió un incremento significativo en el número de frutos del 31.57%, seguido de la aplicación foliar de NPZnO con 13.86%, respectivamente y comparados con el T0 correspondiente. Por otro lado, la aplicación de MDX por vía drench, mostró un incremento de 32.39%, seguido por los bioestimulantes MDP con 27.20%, NPZnO-MDX con 20.76% y NPZnO con 12.98%, en todos los casos comparados con el T0 correspondiente (Figura 4A). El aumento del rendimiento a menudo se asocia con la mejora de la calidad de los frutos, la cual está determinada por las propiedades organolépticas y agronómicas, como es el caso del tamaño del fruto (Di Vittori *et al.*, 2018). Los

bioestimulantes vegetales tienen la capacidad de modificar los procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis y proporcionan beneficios potenciales para mejorar el desarrollo del fruto (Giraldo *et al.*, 2014). A pesar de que aun, no se sabe a profundidad el mecanismo de acción de la maltodextrina y NPZnO como bioestimulantes, en este trabajo se observó que la maltodextrina y nanopartículas, aplicados a 1,000 ppm, demostraron un efecto estimulante en los parámetros de rendimiento como en NF, PF, DPF y DEF de pepino. La maltodextrina presentó el mayor NF, principalmente cuando se aplicó MDP por ambas vías y MDX vía drench. Relacionado a la respuesta anterior, se ha señalado que los bioestimulantes que contiene carbohidratos, como es el caso de la maltodextrina, alteran el metabolismo de las plantas al actuar como moléculas de señalización, con lo que se reduce el alcance de la respuesta negativa de las plantas al estrés y se aumenta la asignación de biomasa al componente de rendimiento cosechado (Brown y Saa, 2015).

El PF fue significativamente mejor con la aplicación de los bioestimulantes, en aspersión vía foliar las NPZnO-MDX promovieron los mejores valores con un aumento de 16.38% (Figura 4B), seguido por MDP con 12.65%, MDX con 9.32% y NPZnO con 10.66% en comparación con el T0 correspondiente. La vía de aplicación drench también favoreció al PF, en este sentido, las NPZnO promovieron un incremento de 22.90%, no obstante que todos los bioestimulantes mejoraron significativamente el PF en comparación con el T0 correspondiente (Figura 4B).

Diámetro polar y ecuatorial del fruto

El DPF tuvo diferencias significativas entre los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas en interacción con las vías de aplicación (Figura 4C). En este parámetro, con la aplicación foliar de las NPZnO-MDX promovieron el aumento de 12.01%, seguido por la MDP y la MDX que aumentaron 8.75 y 7.38%,

respectivamente, en comparación con el T0 correspondiente. Con la aplicación vía drench, las NPZnO promovieron un incremento de 14.04% en comparación al T0 correspondiente, siendo este valor el mayor, no obstante que todos los tratamientos de bioestimulantes fueron significativamente superiores al T0 (Figura 4C).

El DEF presentó diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos con los bioestimulantes maltodextrina y nanopartículas en interacción con las vías de aplicación foliar y drench (Figura 4D). Este parámetro mostró los mejores efectos con la aplicación de MDP y NPZnO-MDX con incremento de 6.35 y 7.00%, respectivamente, sobre el valor del T0. Por otro lado, con la aplicación por vía drench, la MDX y las NPZnO promovieron los mejores resultados con un incremento del DEF de 6.12 y 4.97%, según cada tratamiento, en comparación con el testigo correspondiente (Figura 4D).

Así mismo, la maltodextrina y nanopartículas aumentaron el PF, DPF y DEF, aunque el PF y DEF fue similar entre los bioestimulantes evaluados, pero el DPF de pepino fue superior al aplicar NPZnO. La mejora en la producción de los cultivos al aplicar nanopartículas, como NPZnO, podría ser consecuencia de una mayor movilidad o disponibilidad para su absorción por las plantas (Dimkpa *et al.*, 2020). Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021) reportaron que al aplicar NPZnO vía foliar con dosis de 200 mg·L⁻¹ a plantas de melón se logró un incremento del peso de los frutos. Así mismo, Kolenčík *et al.* (2022) al aplicar 1.0 mg·L⁻¹ de NPZnO vía foliar observó un incremento del número de vainas, peso de mil semillas y el rendimiento de lenteja.

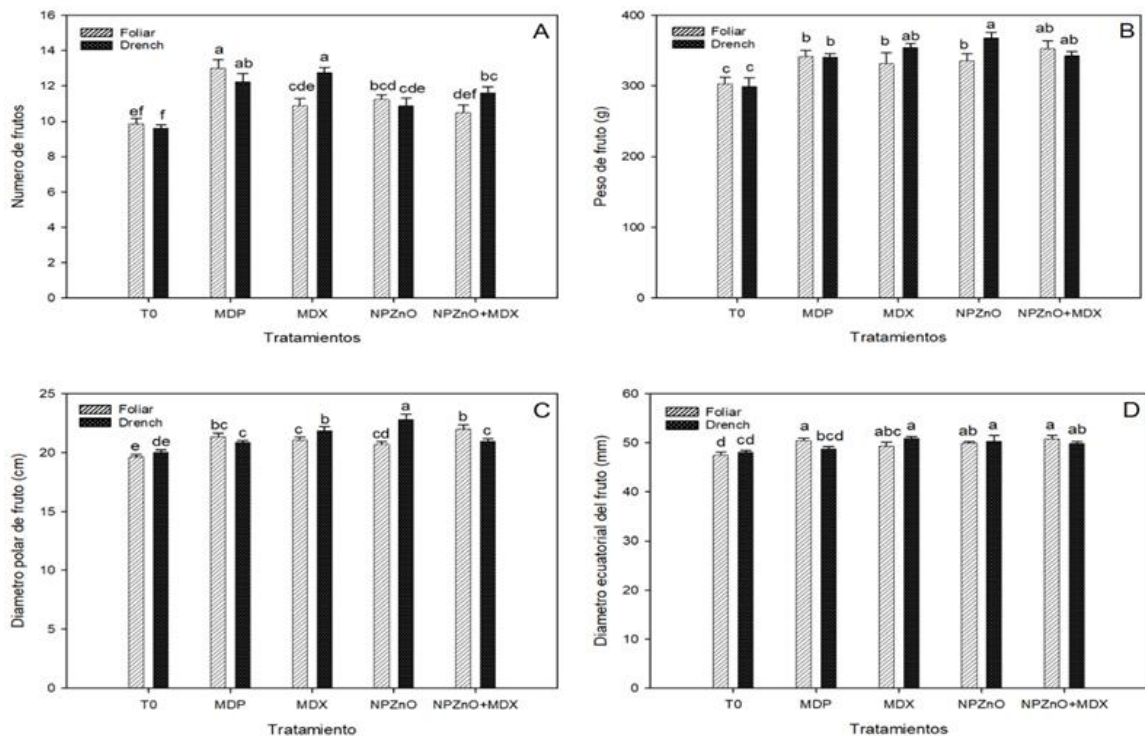


Figura 4. Numero de frutos (NF, 4A), peso de fruto (PF, 4B), diámetro polar del fruto (DPF, 4C) y diámetro ecuatorial del fruto (DEF, 4D) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

Calidad de Fruto

La maltodextrina y las nanopartículas afectaron significativamente las variables de firmeza, parámetros de color (L , a^* y b^*), así como pH, C.E., ORP, AT y VitC; mientras que, la vía de aplicación de los bioestimulantes tuvo efecto en los parámetros de F, pH, ORP, AT y VitC; en tanto que, la interacción de los factores de estudio afectó significativamente a los parámetros de F, L (b^*), C.E., ORP, AT y VitC (Cuadro 4).

En las variables de F y parámetros de color (L , a^* y b^*) todos los bioestimulantes evaluados superaron estadísticamente al T0, también en las variables de AT y VitC, los bioestimulantes tuvieron resultados positivos que superaron

estadísticamente al control (Cuadro 4). Se observó estadísticamente que el valor más alto en la variable F se obtuvo al aplicar NPZnO vía drench; en tanto que, los parámetros de pH, ORP, AT y VitC obtuvieron los mejores resultados al aplicar los bioestimulantes vía foliar (Cuadro 4).

La firmeza (F), mostró un aumento significativo en todos los bioestimulantes aplicados, siendo superiores al T0; de la misma manera, la vía de aplicación también tuvo diferencias estadísticas significativas; sin embargo, cuando la aplicación de los productos se realizó vía drench, se notó mejoría en los resultados para esa variable (Cuadro 4). Se observó un incremento significativo en la F de los frutos de pepino cuando las plantas fueron tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en integración con la vía de aplicación.

El parámetro luminosidad de color (L), tuvo valores sobresalientes cuando se aplicó MDP, MDX y NPZnO con diferencias estadísticas sobre T0, en tanto que el método de aplicación no tuvo efecto significativo sobre este parámetro (Cuadro 4). Además, en esta variable se observó una interacción significativa entre los factores evaluados. En este contexto, se observa para el parámetro de color a^* (tono) fue estadísticamente superior con la aplicación de NPZnO con respecto a los demás tratamientos, que a su vez estos fueron estadísticamente superiores al T0. Por otro lado, tanto en el factor de vía de aplicación como de interacción no se arrojaron diferencias significativas para este parámetro (Cuadro 4). En el caso del parámetro pureza (b^*), se observaron diferencias significativas en donde con la aplicación de NPZnO se incrementaron los valores de esta variable acercándose más al amarillo, siendo diferentes estadísticamente a los demás tratamientos, e incluso al T0 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de medias de variables de calidad de frutos de pepino (*Cucumis sativa* L.), tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.

Tratamiento	F (Kg cm ⁻²)	L	Color a* b*		SST (°Brix)	pH	C. E.	ORP	AT	VitC
Bioestimulantes										
T0	67.87 ^b	34.66 ^b	- 2.76 ^a	2.51 ^c	2.9 ^a	5.81 ^a	4.61 ^{ab}	153.67 ^b	0.07 ^c	2.64 ^c
MDX	67.69 ^b	35.45 ^a	- 3.25 ^b	3.17 ^b	2.91 ^a	5.58 ^c	4.40 ^{bc}	150 ^c	0.08 ^{ab}	2.43 ^b
MDP	67.13 ^b	35.24 ^a	- 3.39 ^{bc}	3.09 ^b	2.78 ^a	5.62 ^{bc}	4.64 ^{ab}	151.33 ^c	0.08 ^b	2.35 ^b
NPZnO-MDX	68.89 ^b	34.90 ^{ab}	- 3.29 ^b	3.17 ^b	2.89 ^a	5.66 ^{bc}	4.31 ^c	158.83 ^a	0.09 ^a	2.74 ^a
NPZnO	71.77 ^a	35.29 ^a	- 3.67 ^c	3.56 ^a	2.91 ^a	5.74 ^{ab}	4.78 ^a	135.17 ^d	0.08 ^b	2.44 ^b
ANOVA	0.0115	0.0523	0.0002	0.0001	0.3346	0.0052	0.0136	0.0001	0.0001	0.0001
Vía de aplicación										
Foliar	67.81 ^b	35 ^a	- 3.22 ^a	3.05 ^a	2.90 ^a	5.72 ^a	4.56 ^a	143.07 ^b	0.08 ^a	2.62 ^a
Drench	69.52 ^a	35.21 ^a	- 3.33 ^a	3.14 ^a	2.85 ^a	5.64 ^b	4.54 ^a	156.53 ^a	0.08 ^b	2.02 ^b
ANOVA	0.0429	0.2379	0.2704	0.1994	0.2619	0.0423	0.8	0.0001	0.0012	0.0001
Bioestimulantes*vía de aplicación										
ANOVA	0.0001	0.0039	0.2215	0.0002	0.4636	0.1997	0.0152	0.0001	0.0618	0.0015
C.V %	3.13	1.31	7.85	6.06	4.27	1.71	5	1.1	5.35	8.79

T0= tratamiento control, MDP= maltodextrina pura, MDX= maltodextrina refinada, NPZnO= nanopartículas de óxido de zinc, NPZnO-MDX= nanopartículas de óxido de zinc recubiertas con maltodextrina, C.V = coeficiente de variación. Letras iguales no presentan diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Los sólidos solubles totales medidos en °Brix (SST), no mostraron diferencias significativas en todos los factores evaluados. Por el contrario, el potencial de hidrogeno (pH), mostró una disminución de los valores con la aplicación MDX, MDP y NPZnO-MDX, mientras que en el método de aplicación se obtuvieron los mejores parámetros al ser aplicados vía foliar (Cuadro 4). Para este parámetro las interacciones de los factores evaluados no tuvieron diferencias significativas.

La variable de conductividad eléctrica (C.E.), presentó una disminución de los valores con la aplicación de MDX y NPZnO-MDX, y fue estadísticamente diferente al T0, mientras que el método de aplicación no afectó el parámetro de C.E. (Cuadro 4). Por otro lado, la interacción de los bioestimulantes y las vías de aplicación expresaron diferencias estadísticas altamente significativas.

La acidez titulable (AT), reveló un aumento significativo en todos los productos evaluados comparados con el T0, siendo el mejor tratamiento las NPZnO, del mismo modo se encontraron diferencias estadísticas significativas en el factor vía de aplicación donde los mejores valores se obtuvieron con aplicaciones foliares (Cuadro 4). También, existieron diferencias significativas en las interacciones evaluadas para este parámetro.

Para la vitamina C (VitC), se encontraron diferencias significativas en la fuente de variación considerada como bioestimulantes, la aplicación de NPZnO fue el tratamiento que promovió los mejores valores incluso diferentes al T0 y superior a todos los demás bioestimulantes, de la misma manera, la vía de aplicación mostró diferencias significativas incrementando los valores de VitC con aplicaciones foliares (Cuadro 4).

Firmeza

Los tratamientos con maltodextrina y nanopartículas asperjados por diferente vía de aplicación tuvieron diferencias significativas sobre la firmeza de los frutos de pepino (Figura 5). En esta variable los tratamientos MDP, MDX y NPZnO mostraron un incremento de 4.08, 2.31 y 7.21%, respectivamente, al ser aplicados vía foliar, por el contrario, la aplicación de NPZnO presentó una disminución de la firmeza al ser aplicado vía foliar, comparado con el T0 correspondiente. Para la vía de aplicación drench los mejores parámetros se obtuvieron al aplicar NPZnO-MDX, NPZnO y MDX y fueron estadísticamente superiores al T0 correspondiente (Figura 5).

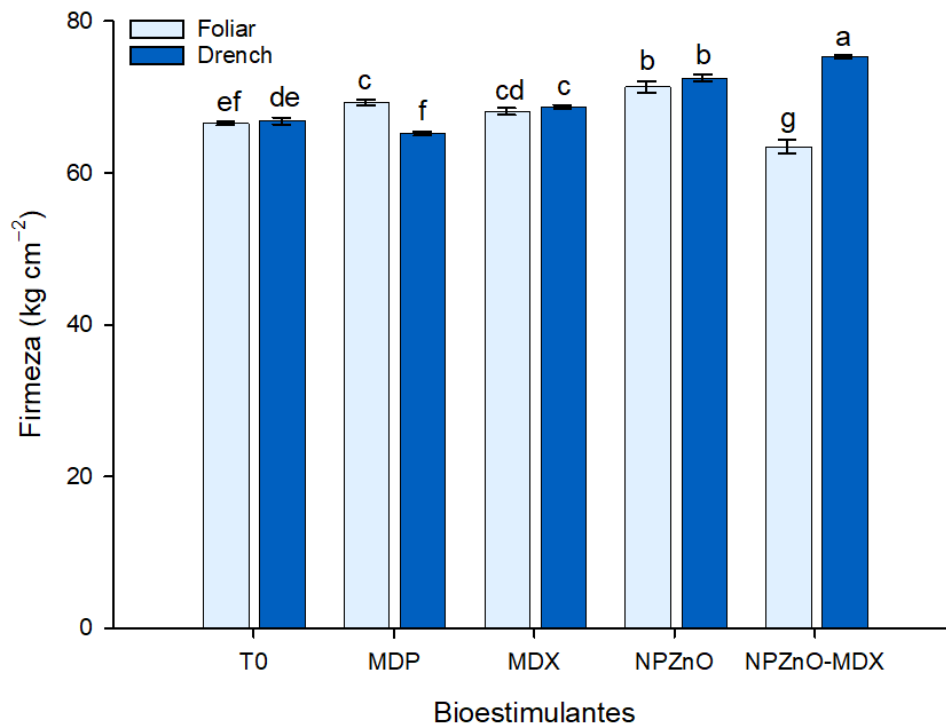


Figura 5. Firmeza (F) de frutos de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

La firmeza en los frutos de pepino está determinada por varios factores. En primer lugar, la estructura de la pared celular es crucial. La presencia de una pared celular gruesa y resistente compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosas y pectinas contribuye a la firmeza de los frutos. Estos componentes proporcionan rigidez y resistencia mecánica a las células del tejido del pepino (Cheng *et al.*, 2023; Balic *et al.*, 2022).

Parámetros de color L y b*

El parámetro L de color fue significativamente diferente con la interacción de los bioestimulantes y la vía de aplicación, en este parámetro se obtuvieron los valores más altos con la aplicación de MDP, MDX y NPZnO-MDX por vía foliar; lo que fue superior al T0 correspondiente, con un incremento de 3.57. 5.21 y 1.43,

respectivamente. De la misma manera, se observó un aumento de este parámetro con la aplicación vía drench de los bioestimulantes siendo la aplicación de NPZnO el mejor tratamiento con un 5.62% de luminosidad en los frutos, comparado con el testigo correspondiente (Figura 6A). De la misma manera para la variable de pureza (b^*), se obtuvieron diferencias significativas en la interacción de los bioestimulantes con la vía de aplicación al usar NPZnO por vía drench, donde se incrementó un 63.02% comparado con el testigo correspondiente (Figura 6B).

Dentro de las características relacionadas con la calidad de la fruta, se pueden destacar los siguientes aspectos: durante el proceso de maduración, el pigmento verde clorofila se descompone y se producen los carotenoides (Ruelas-Chacón *et al.*, 2017, estos carotenoides se sintetizan a partir de un precursor incoloro llamado fitoeno y dan lugar a colores como el caroteno (amarillo pálido), licopeno (rojo), β -caroteno (naranja), xantofilas y carotenoides hidroxilados (amarillo) (Fagundes *et al.*, 2015; Aguilar-Méndez *et al.*, 2008). La variación en los valores para el parámetro de color, como L, a^* y b^* contribuye a la variabilidad en la apariencia de la fruta. Estos parámetros representan el matiz (color), la luminosidad (brillo) y la saturación (nitidez) de un objeto en el espacio de color, y se utilizan para clasificar los colores (Minolta, 2003). En un estudio reciente, se observó que la aplicación de NPZnO en una concentración de $2,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ aumentó los valores de L, a^* y b^* en comparación con el control, lo que indica una mayor intensidad de color (García-López *et al.*, 2019).

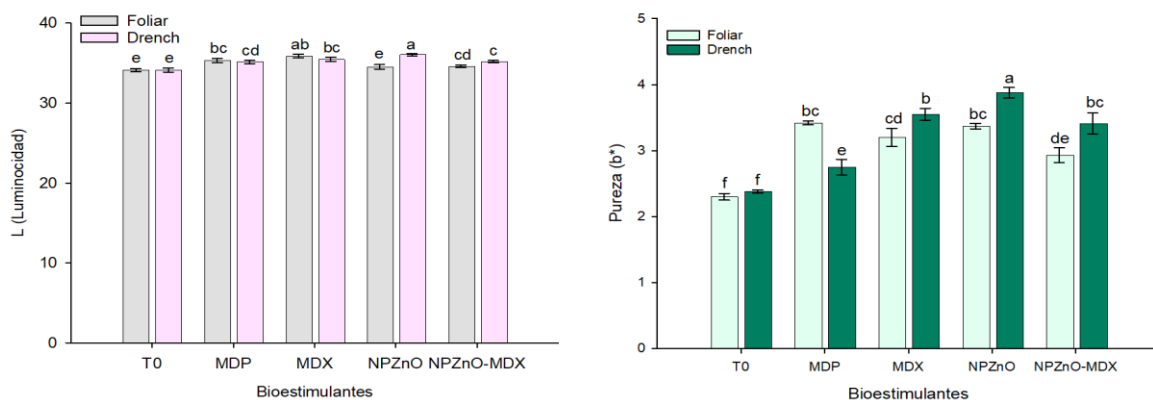


Figura 6. Luminosidad (6A) y pureza (b*) (6B) de frutos de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas (P≤0.05).

Pigmentos fotosintéticos

La maltodextrina y las nanopartículas afectaron significativamente las variables de clorofila en fruto y hoja, así mismo, en la vía de aplicación de los bioestimulantes tuvieron efecto significativo en la clorofila en fruto, en tanto que, la interacción de los factores en estudio afectó significativamente los parámetros de clorofila a, b y total en fruto (Cuadro 5).

De manera general, los bioestimulantes evaluados superaron estadísticamente al T0 en los parámetros de clorofila en fruto y hoja, con excepción de Claf en el cual no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 5). El mayor contenido de clorofila en fruto se obtuvo al aplicar NPZnO y NPZnO-MDX; así mismo, las Clah, Clbh y Clth obtuvieron los mejores valores sobre todos los tratamientos con la aplicación de MDP; en tanto que la Claf y Cltf fue mayor cuando se realizó la aplicación por vía drench. La aplicación por vía foliar tuvo mejor efecto en la actividad fotosintética, debido a que estimuló el incremento del contenido de Clah, Clbh y Clth (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de medias de variables de pigmentos fotosintéticos en hojas y frutos de pepino (*Cucumis sativa* L.), tratadas con maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc por diferentes vías de aplicación.

Tratamiento	Claf (mg·g ⁻¹)	Clbf (mg g ⁻¹)	Cltf (mg g ⁻¹)	Clah (mg g ⁻¹)	Clbh (mg·g ⁻¹)	Clth (mg·g ⁻¹)
Bioestimulantes						
T0	0.24 ^a	0.14 ^c	0.39 ^c	1.25 ^c	2.18 ^c	3.21 ^c
MDP	0.24 ^a	0.17 ^{ab}	0.40 ^{bc}	1.54 ^a	4.52 ^a	6.19 ^a
MDX	0.27 ^a	0.16 ^{bc}	0.43 ^{ab}	1.47 ^{ab}	3.59 ^b	4.76 ^b
NPZnO	0.26 ^a	0.18 ^{ab}	0.45 ^a	1.42 ^b	3.55 ^b	4.86 ^b
NPZnO- MDX	0.27 ^a	0.19 ^a	0.45 ^a	1.39 ^b	3.18 ^b	4.36 ^b
ANOVA	0.1293	0.0073	0.0076	0.001	0.0001	0.0001
Vía de aplicación						
Foliar	0.24 ^b	0.16 ^a	0.41 ^b	1.49 ^a	3.76 ^a	5.06 ^a
Drench	0.27 ^a	0.17 ^a	0.44 ^a	1.35 ^b	3.06 ^b	4.29 ^b
ANOVA	0.006	0.3865	0.009	0.0028	0.0033	0.0051
Bioestimulantes*Vía de aplicación						
ANOVA	0.0001	0.0009	0.0003	0.0013	0.0035	0.0123
C.V %	9.62	12.79	7.73	7.44	16.62	14.21

T0= tratamiento control, MDP= maltodextrina pura, MDX= maltodextrina refinada, NPZnO= nanopartículas de óxido de zinc, NPZnO-MDX= nanopartículas de óxido de zinc recubiertas con maltodextrina, C.V = coeficiente de variación. Letras iguales no presentan diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Clorofila a en fruto y hoja

La interacción de los factores bioestimulantes y vía de aplicación (Figura 7) mostraron efecto contrastante en el contenido de clorofila a en fruto y hoja (Figura 7). Se observó un incremento significativo del 48% en la Claf cuando se aplicó MDX por vía drench, efecto contrario se observó en este mismo parámetro (Claf) con la aplicación por vía foliar de MDX, que presentó un efecto de -28%, este valor negativo fue estadísticamente diferente a T0 (Figura 7A). La aplicación vía foliar de MDP, NPZnO+MDX y NPZnO mejoraron significativamente la concentración de Clah, en este parámetro la MDP promovió el mayor incremento con 45.52%, seguido de NPZnO+MDX y NPZnO con 25.20% y 18.69%, respectivamente, lo que superó estadísticamente al T0 correspondiente; la

aplicación de MDX tuvo mejor efecto sobre Claf cuando se aplicó por vía drench, y de igual forma supero a el testigo (T0), correspondiente a esta vía de aplicación (Figura 7B).

La clorofila a absorber principalmente la luz en las regiones azul y roja del espectro electromagnético, mientras que refleja la luz verde. Esto explica por qué las plantas tienen un color verde, ya que la clorofila a no es eficiente en la absorción de la luz verde (Croce y Takahashi, 2023; Green *et al.*, 2003), bajo este contexto, se puede explicar por qué los frutos tratados con MDX vía drench obtuvieron los valores más altos en Claf, y presentaron un rango de color verde más elevado en los análisis de calidad.

Por otro lado, la clorofila b tiene un espectro de absorción ligeramente diferente y absorbe principalmente en el rango de longitud de onda azul y amarillo-verde (Tanaka y Tanaka, 2019). La relación entre la clorofila a y la clorofila b es complementaria. La clorofila b captura la luz en las regiones donde la clorofila a tiene una menor capacidad de absorción, lo que amplía el espectro de luz que es utilizado para la fotosíntesis, lo que permite a las plantas aprovechar una mayor cantidad de energía lumínica y, en consecuencia, aumentar su capacidad para convertir la luz solar en energía química (Katayama, 2022).

La energía capturada por la clorofila a se utiliza para impulsar una serie de procesos químicos en la fotosíntesis, para la producción de ATP. Durante la fase de luz de la fotosíntesis, la energía lumínica se utiliza para generar un gradiente de concentración de protones a través de la membrana del tilacoide en el cloroplasto. Este gradiente de protones se utiliza posteriormente por la ATP sintasa, una enzima presente en la membrana del tilacoide, para sintetizar ATP a partir de adenosín difosfato (ADP) y fosfato inorgánico (Pi) (Croteau *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2018). El ATP producido en la fotosíntesis se utiliza en numerosos procesos metabólicos dentro de las células vegetales, incluso en el crecimiento y desarrollo. El ATP proporciona la energía necesaria para la síntesis de

moléculas orgánicas, como carbohidratos, lípidos y proteínas, que son fundamentales para el crecimiento celular y la expansión de los tejidos vegetales (Heldt y Piechulla, 2021). De esta manera se puede explicar que la MDP aplicada vía foliar obtuviera los mejores valores de rendimiento, dado que fue el que tuvo más elevada la clah.

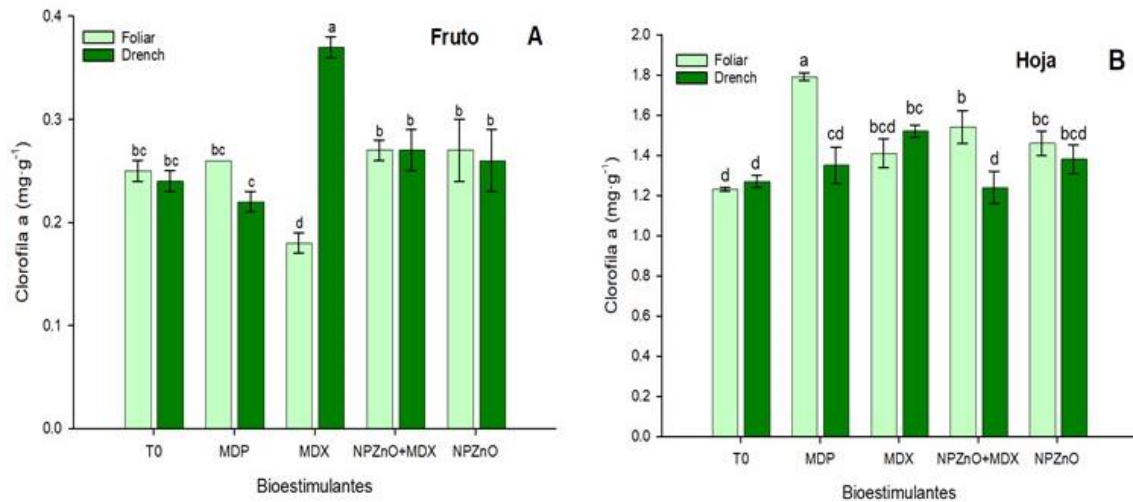


Figura 7. Clorofila a en fruto (8A) y hoja (8B) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

Clorofila b en fruto y hoja

Así mismo, la interacción de los factores evaluados (Tabla 8) indica que los bioestimulantes y la vía de aplicación tuvieron diferencias sobre el contenido de clorofila b en fruto y hoja (Figura 8A y 8B). La aplicación de los bioestimulantes MDP y MDX por vía foliar promovió incremento significativo de la Claf de 53.84 % y 30.73 %, respectivamente, comparado con T0 correspondiente; en tanto que las NPZnO-MDX y NPZnO aplicadas por vía drench promovieron los mejores resultados con valores de 61.53 % y 60.18 %, respectivamente, superiores al T0 respectivo (Figura 8A). Sin embargo, a excepción de la aplicación vía drench de NPZ-MDX, todos los bioestimulantes presentaron incremento significativo en el contenido de Clbh, superior a los testigos correspondientes. A diferencia del resto de los tratamientos evaluados, la vía de aplicación foliar de MDP mostró

consistencia en su afecto significativo en el incremento del contenido de Clb tanto en fruto como en hoja (Figura 8B).

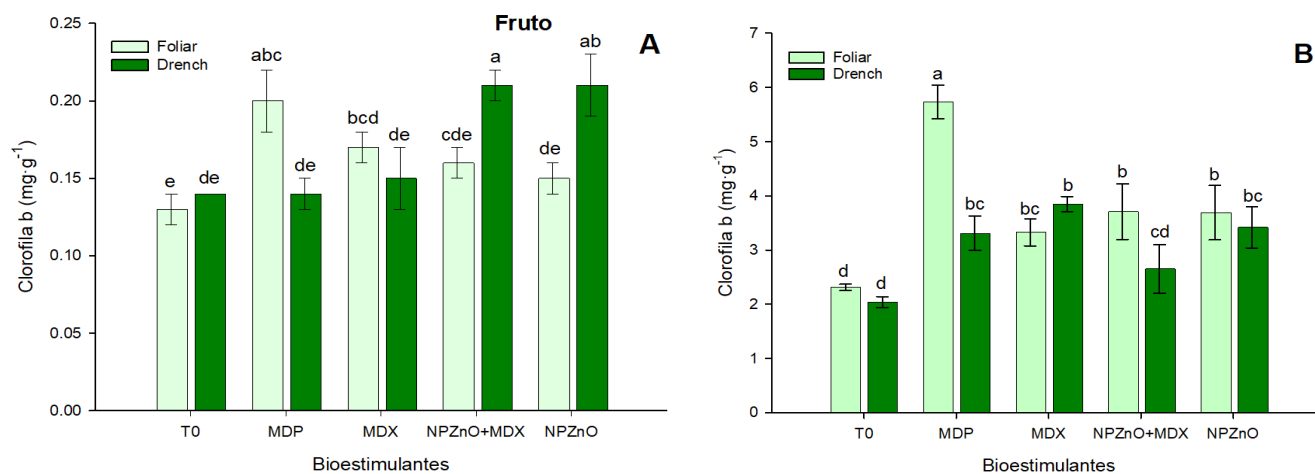


Figura 7. Clorofila b en fruto (9A) y hoja (9B) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

Clorofila total en fruto y hoja

La interacción de los factores estudiados (Figura 9) arrojó que los bioestimulantes y la vía de aplicación afectaron de forma significativa el contenido de clorofila total en fruto y hoja (Figura 9A y 9B). Al aplicar vía drench MDX, NPZnO-MDX y NPZnO se observó un incremento significativo de la Clt_f por 34.16%, 26.85% y 23.15%, respectivamente, estos valores fueron superiores al T0 correspondiente. En tanto que con la aplicación vía foliar de los bioestimulantes no mostraron diferencias significativas en el contenido de Clt_f respecto al T0 (Figura 19A). Sin embargo, a excepción de la aplicación de NPZnO-MDX vía drench, todos los bioestimulantes promovieron un elevado contenido de Clt_h respecto al testigo correspondiente y, en promedio excepto la aplicación foliar de MDP todos fueron similares (Figura 19B).

Algunos estudios sugieren que la exposición a las nanopartículas de ZnO pueden tener efectos en la cantidad de clorofila en las hojas y frutos de las plantas (Chen *et al.*, 2023). Se han demostrado que la exposición a las nanopartículas de ZnO aumenta la concentración de clorofila en las hojas de las plantas (Reshma y Meenal, 2022), esto se debe a que el zinc presente en las nanopartículas, es un micronutriente esencial para la síntesis de clorofila (Verma *et al.*, 2021). El aumento en la concentración de clorofila resulta en una mayor eficiencia fotosintética y, por lo tanto, en un aumento en la producción de biomasa. No obstante, otros estudios han informado efectos negativos de las nanopartículas de ZnO en la cantidad de clorofila (Naz *et al.*, 2022), debido a que se ha observado que altas concentraciones de nanopartículas de ZnO pueden causar estrés oxidativo en las plantas, lo que lleva a la degradación de la clorofila y a una disminución en su contenido (Kashyap *et al.*, 2022). El estrés oxidativo se produce por la generación excesiva de especies reactivas de oxígeno, que dañan los pigmentos y las estructuras celulares de las plantas (Borges *et al.*, 2023).

También se ha descubierto que el tamaño y la forma de las nanopartículas de ZnO influyen sobre los efectos de la cantidad de clorofila. Por ejemplo, se ha observado que las nanopartículas de menor tamaño tienen una mayor capacidad para penetrar en las células vegetales y causar daño a nivel celular (Kashyap y Shekhawat, 2022).

La maltodextrina en sí misma no proporciona nutrientes esenciales para la síntesis de clorofila; sin embargo, dado que la maltodextrina es un carbohidrato soluble puede proporcionar energía a las plantas y contribuir al crecimiento y desarrollo general de las mismas (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021), como se observó en este trabajo sobre todo con la MDP.

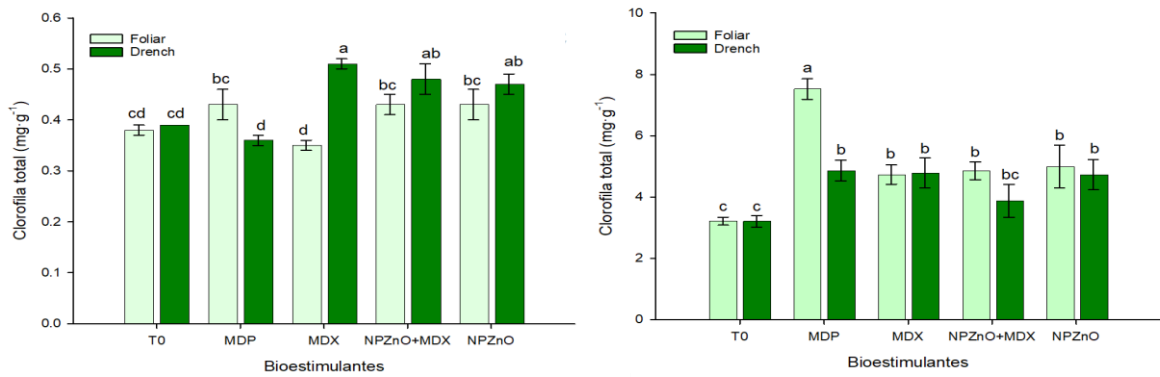


Figura 8. Clorofila total en fruto (9C) y hoja (9B) de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La aplicación de maltodextrina y nanopartículas presentaron efecto positivo en el crecimiento e incrementaron la acumulación de biomasa y mejoraron los parámetros de rendimiento y calidad en las plantas de pepino; sin embargo, se identificó que la MDP en ambas vías de aplicación y la MDX aplicada por vía drench promovieron el mayor número de frutos y MDP vía foliar mejoró la concentración de pigmentos fotosintéticos en hoja; en tanto que, la NPZnO por vía drench presentó el mayor DPF, respecto al resto de los bioestimulantes evaluados, pero provocó efectos negativos en la producción de biomasa. Las NPZnO-MDX tuvieron su mejor efecto en los parámetros de calidad ORP, AT y VitC, además de los pigmentos fotosintéticos en fruto.

La información disponible sobre los efectos benéficos de la maltodextrina como promotor de crecimiento en plantas es aún muy limitada, por lo que, los resultados encontrados en este trabajo ayudan a entender los efectos estimulantes de este polisacárido en las plantas cultivadas y su impacto en el crecimiento y en los parámetros de rendimiento de fruto.

BIBLIOGRAFIA

A.O.A.C. Official method of analysis (1990). Association of Official Analytical Chemistry. 16th edition, Ed. By Horwitz, N., P. Chialo, y H. Reynold, Washington, USA.

Aguilar-Méndez, M. A., Martín-Martínez, E. S., Tomas, S. A., Cruz-Orea, A., & Jaime-Fonseca, M. R. (2008). Gelatine–starch films: Physicochemical properties and their application in extending the post-harvest shelf life of avocado (*Persea americana*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(2), 185-193.

Al-Karaki, G. N., & Othman, Y. (2023). Effect of foliar application of amino acids biostimulants on growth, macronutrient, total phenols contents and antioxidant activity of soilless grown lettuce cultivars. *South African Journal of Botany*, 154, 225-231.

Anand, A., Rajchakit, U., & Sarojini, V. (2020). Detection and removal of biological contaminants in water: the role of nanotechnology. In *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants* (pp. 69-110). Elsevier.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 17th end, edited by W. Horwitz. Association of Official Analytical Chemists. Arlington.

Awasthi, K. (2021). General introduction of zinc oxide nanomaterials. In *Nanostructured Zinc Oxide* (pp. 1-19). Elsevier.

Balic, I., Olmedo, P., Zepeda, B., Rojas, B., Ejsmentewicz, T., Barros, M., ... & Campos-Vargas, R. (2022). Metabolomic and biochemical analysis of mesocarp tissues from table grape berries with contrasting firmness reveals cell wall

modifications associated to harvest and cold storage. *Food Chemistry*, 389, 133052.

Beale, S. I. (2009). Biosynthesis of chlorophylls and hemes. In *The Chlamydomonas Sourcebook* (pp. 731-798). Academic Press.

Bhattacharya, S. (2022). *Snacks: Procesamiento y Tecnología*. Prensa Académica.

Borges, C. V., Orsi, R. O., Maraschin, M., & Lima, G. P. P. (2023). Oxidative stress in plants and the biochemical response mechanisms. In *Plant Stress Mitigators* (pp. 455-468). Academic Press.

Brown P, Saa S (2015) Biostimulants in agriculture. *Frontiers in plant science*, 6, 671.

Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., González-Franco, A. C., Robles-Hernández, L., & López-Ochoa, G. R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*, 43(4), 242-248.

Chanu-Thounaojam T, Thounaojam TM, Upadhyaya H (2021) Role of zinc oxide nanoparticles in mediating abiotic stress responses in plant. Chapter 16. *Zinc-Based Nanostructures for Environmental and Agricultural Applications* Elsevier. Pp:323-337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822836-4.00027-6>

Chauhan, N. S. (2023). The impact of nanoparticles in agriculture and soil: conclusion and future recommendations. In *The Impact of Nanoparticles on Agriculture and Soil* (pp. 403-408). Academic Press.

Chen, F., Li, Y., Zia-ur-Rehman, M., Hussain, S. M., Qayyum, M. F., Rizwan, M., ... & Ali, S. (2023). Combined effects of zinc oxide nanoparticles and melatonin

on wheat growth, chlorophyll contents, cadmium (Cd) and zinc uptake under Cd stress. *Science of The Total Environment*, 864, 161061.

Cheng, J. H., He, L., Sun, D. W., Pan, Y., & Ma, J. (2023). Inhibition of cell wall pectin metabolism by plasma activated water (PAW) to maintain firmness and quality of postharvest blueberry. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107803.

Croteau, D., Alric, J., & Bailleul, B. (2023). The multiple routes of photosynthetic electron transfer in *Chlamydomonas reinhardtii*. In *The Chlamydomonas Sourcebook* (pp. 591-613). Academic Press.

Di Vittori L, Mazzoni L, Battino, M, Mezzetti B (2018) Pre-harvest factors influencing the quality of berries. *Scientia Horticulturae*, 233, 310-322.

Dimkpa CO, Andrews J, Sanabria J, Bindraban PS, Singh U, Elmer WH, White JC (2020) Interactive effects of drought, organic fertilizer, and zinc oxide nanoscale and bulk particles on wheat performance and grain nutrient accumulation. *Science of the Total Environment*, 722, 137808.

Dresselhaus T, Hückelhoven R (2018) Biotic and Abiotic Stress Responses in Crop Plants. *Agronomy*, 8(11), Art. 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110267>

Elemike EE, Uzoh IM, Onwudiwe DC, Babalola OO (2019) El papel de la nanotecnología en la fortificación de los nutrientes de las plantas y la mejora de la producción de cultivos. *Ciencias Aplicadas*, 9 (3), 499.

Fagundes, C., Moraes, K., Pérez-Gago, M. B., Palou, L., Maraschin, M., & Monteiro, A. R. (2015). Effect of active modified atmosphere and cold storage on the postharvest quality of cherry tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 109, 73-81.

García López, J. I. (2019). Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Gatti N, Gomez MI, Bennett RE, Scott-Sillett T, Bowe J (2022) Eco-labels matter: Coffee consumers value agrochemical-free attributes over biodiversity conservation. *Food Quality and Preference*, 98: 104509. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104509>

Gemin, L. G., de Lara, G. B., Mógor, Á. F., Mazaro, S. M., Sant'Anna-Santos, B. F., Mógor, G., ... & Marques, H. M. C. (2023). Polysaccharides combined to copper and magnesium improve tomato growth, yield, anti-oxidant and plant defense enzymes. *Scientia Horticulturae*, 310, 111758.

Ghani MI, Saleem S, Rather SA, Rehmani MS, Alamri S, Rajput VD, Kalaji HM, Saleem N, Sial TA, Liu M (2022) Foliar application of zinc oxide nanoparticles: An effective strategy to mitigate drought stress in cucumber seedling by modulating antioxidant defense system and osmolytes accumulation. *Chemosphere* 289: 133202. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133202.

Giraldo JP, Landry MP, Faltermeier SM, McNicholas TP, Iverson NM, Boghossian AA, Reuel NF, Hilmer AJ, Sen F, Brew JA, Strano MS (2014) Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing. *Nature Materials* 13(4): Art. 4. DOI: 10.1038/nmat3890.

González-García Y, González-Moscoso M, Hernández-Hernández H, Méndez-López A, Juárez-Maldonado A (2021) Induction of Stress Tolerance in Crops by Applying Nanomaterials. Chapter 8. En *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection*. John Wiley & Sons, Ltd. Pp:129-169. <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch8>

González-Morales S, Cárdenas-Atayde PA, Garza-Alonso CA, Robledo-Olivo A, Benavides-Mendoza A (2022) Plant biostimulation with nanomaterials: a physiological and molecular standpoint. In *Inorganic Nanopesticides and Nanofertilizers: A View from the Mechanisms of Action to Field Applications* (pp. 153-185).

Green, B., Parson, WW y Parson, WW (Eds.). (2003). *Antenas captadoras de luz en la fotosíntesis* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

Guleria, G., Thakur, S., Shandilya, M., Sharma, S., Thakur, S., & Kalia, S. (2022). Nanotechnology for sustainable agro-food systems: The need and role of nanoparticles in protecting plants and improving crop productivity. *Plant Physiology and Biochemistry*.

Gupta, S., Kulkarni, M. G., White, J. F., Stirk, W. A., Papenfus, H. B., Doležal, K., ... & Van Staden, J. (2021). Categories of various plant biostimulants—mode of application and shelf-life. In *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development* (pp. 1-60). Academic Press.

Heldt, H. W., & Piechulla, B. (2021). *Plant biochemistry*. Academic Press.

Hossain K, Abbas SZ, Ahmad A, Rafatullah M, Ismail N, Pant G, et al (2020) Nanotechnology: A Boost for the Urgently Needed Second Green Revolution in Indian Agriculture. In: Hakeem, K., Pirzadah, T. (eds) *Nanobiotechnology in Agriculture: Nanotechnology in the Life Sciences* Pp:15-33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39978-8_2

Hou J, Wu Y, Li X, Wei B, Li S, Wang X (2018) Toxic effects of different types of zinc oxide nanoparticles on algae, plants, invertebrates, vertebrates and microorganisms. *Chemosphere*, 193: 852-860. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.077>

Hsieh CH (2007) Spherical Zinc Oxide Nano Particles from Zinc Acetate in the Precipitation Method. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 54(1):31-34. <https://doi.org/10.1002/jccs.200700006>.

Huang, W., Tikkanen, M., Cai, Y. F., Wang, J. H., & Zhang, S. B. (2018). Chloroplastic ATP synthase optimizes the trade-off between photosynthetic CO₂ assimilation and photoprotection during leaf maturation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1859(10), 1067-1074.

Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., ... & Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(1), 162.

Kaningini AG, Nelwamondo AM, Azizi S, Maaza M, Mohale KC (2022) Metal nanoparticles in agriculture: A review of possible use. *Coatings* 12(10): 10. DOI: 10.3390/coatings12101586.

Kashyap, K., & Shekhawat, G. S. (2022). Properties, particle-size, shape, synthesis, concentration and medium dependent toxicity of nanoparticles in plants. In *Toxicity of Nanoparticles in Plants* (pp. 95-107). Academic Press.

Katayama, M. (2022). Fundamental physiological processes: Photosynthesis, light-harvesting complex, and carbon-concentrating mechanisms. In *Cyanobacterial Physiology* (pp. 17-28). Academic Press.

Kaur, H., Chahal, S., Jha, P., Pandey, D. K., Arencibia, A. D., & Kumar, V. (2021). Biostimulants, the cinderella for plant development. In *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development* (pp. 61-72). Academic Press.

Kavian, S., Safarzadeh, S., & Yasrebi, J. (2022). Zinc improves growth and antioxidant enzyme activity in Aloe vera plant under salt stress. *South African Journal of Botany*, 147, 1221-1229.

Kerchev P, van der Meer T, Sujeeth N, Verlee A, Stevens CV, Van Breusegem F, (2020) Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. *Biotechnology Advances*, 40: 107503. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107503>

Khan, A. U. H., Liu, Y., Fang, C., Naidu, R., Shon, H. K., Rogers, Z., & Dharmarajan, R. (2023). A comprehensive physicochemical characterization of zinc oxide nanoparticles extracted from sunscreens and wastewaters. *Environmental Advances*, 100381.

Khan, A. U. H., Liu, Y., Fang, C., Naidu, R., Shon, H. K., Rogers, Z., & Dharmarajan, R. (2023). A comprehensive physicochemical characterization of zinc oxide nanoparticles extracted from sunscreens and wastewaters. *Environmental Advances*, 100381.

Khan, S., Naushad, M., Al-Gheethi, A., & Iqbal, J. (2021). Engineered nanoparticles for removal of pollutants from wastewater: Current status and future prospects of nanotechnology for remediation strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106160.

Kolbert Z, Szöllősi R, Rónavári A, Molnár Á (2022) Nanoforms of essential metals: from hormetic phytoeffects to agricultural potential. *Journal of experimental botany*, 73(6), 1825-1840.

Kolenčík M, Ernst D, Komár M, Urík M, Šebesta M, Ďurišová L, Bujdos M, Černý I, Chlpík J, Juriga M, Illa R, Qian Y, Feng H, Kratošová G, Barabaszová KČ, Ducsay L, Aydın E (2022) Effects of foliar application of ZnO nanoparticles on

lentil production, stress level and nutritional seed quality under field conditions. *Nanomaterials*, 12(3), 310.

Kong, H., Yu, L., Gu, Z., Li, Z., Ban, X., Cheng, L., ... & Li, C. (2021). Fine structure impacts highly concentrated starch liquefaction process and product performance. *Industrial Crops and Products*, 164, 113347.

Li, Y., Zhao, F., Li, C., Ban, X., Gu, Z., & Li, Z. (2022). Fine structures of added maltodextrin impact stability of frozen bread dough system. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120028.

Lolodi O (2011) Microencapsulation of colistin sodium methanesulfonate in gum arabic and maltodextrin by spray drying. *Trends in Applied Sciences Research*, 6(8), 877.

Mani, V. M., Nivetha, S., Sabarathinam, S., Barath, S., Das, M. A., Basha, S., ... & Pugazhendhi, A. (2022). Multifunctionalities of mycosynthesized zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) from *Cladosporium tenuissimum* FCBGr: antimicrobial additives for paints coating, functionalized fabrics and biomedical properties. *Progress in Organic Coatings*, 163, 106650.

Méndez-López A, González-García Y, Juárez-Maldonado (2022) Stimulatory role of nanomaterials on agricultural crops. *Nano-enabled Agrochemicals in Agriculture*. Chapter 14. Academic Press 219-246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91009-5.00013-6>

Metawea, O. R., Teleb, M., Haiba, N. S., Elzoghby, A. O., Khafaga, A. F., Noreldin, A. E., ... & Khalil, H. H. (2023). Folic acid-poly (N-isopropylacrylamide-maltodextrin) nanohydrogels as novel thermo-/pH-responsive polymer for resveratrol breast cancer targeted therapy. *European Polymer Journal*, 182, 111721.

Mirzabaev A, Bezner-Kerr R, Hasegawa T, Pradhan P, Wreford A, Tirado-vonder-Pahlen MC (2023) Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*, 39: 100473. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473>

Mofokeng, M. M., Araya, H. T., Araya, N. A., Makgato, M. J., Mokgehle, S. N., Masemola, M. C., ... & Amoo, S. O. (2021). Integrating biostimulants in agrosystem to promote soil health and plant growth. In *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development* (pp. 87-108). Academic Press.

Naz, M., Bouzroud, S., Raza, M. A., Tariq, M., & Fan, X. (2022). Metal oxide nanoparticles toxicity testing on terrestrial plants. In *Toxicity of Nanoparticles in Plants* (pp. 317-331). Academic Press.

Neme, K., Nafady, A., Uddin, S., & Tola, Y. B. (2021). Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: Food security implication and challenges. *Heliyon*, 7(12), e08539.

Padayatty, S. J., Daruwala, R., Wang, Y., Eck, P. K., Song, J., Koh, W. S., & Levine, M. (2001). Vitamin C: from molecular actions to optimum intake. In *Handbook of antioxidants* (pp. 136-165). CRC press.

Pérez-Velasco EA, Betancourt Galindo R, Valdez Aguilar LA, González Fuentes JA, Puente Urbina BA, Lozano Morales SA, Sánchez Valdés S (2020) Effects of the morphology, surface modification and application methods of ZnO-NPs on the growth and biomass of tomato plants. *Molecules*, 25(6), 1282.

Prakash, V., Rai, P., Sharma, N. C., Singh, V. P., Tripathi, D. K., Sharma, S., & Sahi, S. (2022). Application of zinc oxide nanoparticles as fertilizer boosts growth in rice plant and alleviates chromium stress by regulating genes involved in oxidative stress. *Chemosphere*, 303, 134554.

Rakhimol, K. R., Thomas, S., Kalarikkal, N., & Jayachandran, K. (2021). Nanotechnology in controlled-release fertilizers. In *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture* (pp. 169-181). Academic Press.

Rao, M. P. N. (2023). Fungal synthesis of zinc oxide nanoparticles and its applications in biomedical, environmental, and agri-food sectors. In *Fungal Cell Factories for Sustainable Nanomaterials Productions and Agricultural Applications* (pp. 115-130). Elsevier.

Reshma, Z., & Meenal, K. (2022). Foliar application of biosynthesised zinc nanoparticles as a strategy for ferti-fortification by improving yield, zinc content and zinc use efficiency in amaranth. *Heliyon*, 8(10), e10912.

Rivera-Gutiérrez RG, Preciado-Range P, Fortis-Hernández M, Betancourt-Galindo R, Yescas-Coronado P, Orozco-Vidal JA (2021) Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón | *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(5) pp:791-803.

Roberta Croce, Yuichiro Takahashi, Chapter 15 - Photosynthesis: light harvesting, Editor(s): Arthur R. Grossman, Francis-André Wollman, *The Chlamydomonas Sourcebook (Third Edition)*, Academic Press, 2023, Pages 509-524, ISBN 9780128214305, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821430-5.00026-2>.

Ruelas-Chacon, X., Contreras-Esquivel, J. C., Montañez, J., Aguilera-Carbo, A. F., Reyes-Vega, M. L., Peralta-Rodriguez, R. D., & Sánchez-Brambila, G. (2017). Guar gum as an edible coating for enhancing shelf-life and improving postharvest quality of roma tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Food Quality*, 2017.

Saleem, S., Jameel, M. H., Rehman, A., Tahir, M. B., Irshad, M. I., Jiang, Z. Y., ... & Hessian, M. M. (2022). Evaluation of structural, morphological, optical, and

electrical properties of zinc oxide semiconductor nanoparticles with microwave plasma treatment for electronic device applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2126-2134.

Sarathi, R., Sheeba, N. L., Essaki, E. S., & Sundar, S. M. (2022). Titanium doped Zinc Oxide nanoparticles: A study of structural and optical properties for photocatalytic applications. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1859-1863.

Sardrodi, M. M., Atigh, Z. B. Q., Dehghanian, Z., Balilashaki, K., Lajayer, B. A., & Astatkie, T. (2022). Application of biostimulants to improve agronomic and physiological responses of plants: a review. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, 31-44.

Saritha, G. N. G., Anju, T., & Kumar, A. (2022). Nanotechnology-Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture?. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100457.

Seppelt R, Klotz S, Peiter E, Volk M (2022) Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. *IScience*, 25(12): 105551. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105551>

Sharma, D., Afzal, S., & Singh, N. K. (2021). Nanopriming with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds. *Journal of Biotechnology*, 336, 64-75.

SIAP (2022) Panorama Agroalimentario 2022. Servicio de Información agroalimentaria y Pesquera. México. 215p.

Singh K (2016) Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land Degradation & Development*, 27(3): 706-718. <https://doi.org/10.1002/ldr.2385>

Singh, K., Thakur, S. S., Ahmed, N., Alharby, H. F., Al-Ghamdi, A. J., Al-Solami, H. M., ... & Yadav, S. (2022). Ecotoxicity assessment for environmental risk and consideration for assessing the impact of silver nanoparticles on soil earthworms. *Heliyon*, 8(10), e11167.

Sinha, K., Ghosh, J., & Sil, P. C. (2017). New pesticides: a cutting-edge view of contributions from nanotechnology for the development of sustainable agricultural pest control. In *New pesticides and soil sensors* (pp. 47-79). Academic Press.

Smrčková, P., Horský, J., Šárka, E., Koláček, J., Netopilík, M., Walterová, Z., ... & Hrušková, K. (2013). Hydrolysis of wheat B-starch and characterisation of acetylated maltodextrin. *Carbohydrate polymers*, 98(1), 43-49.

Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15(2):134-154.

Subramani, K., Elhissi, A., Subbiah, U., & Ahmed, W. (2019). Introduction to nanotechnology. In *Nanobiomaterials in clinical dentistry* (pp. 3-18). Elsevier.

Suchithra, M. R., Muniswami, D. M., Sri, M. S., Usha, R., Rasheeq, A. A., Preethi, B. A., & Dineshkumar, R. (2022). Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation. *South African Journal of Botany*, 146, 740-750.

Suwendu Bhattacharya, Chapter 9 - Sugars, sweeteners, chocolates, and sweet snacks, Editor(s): Suwendu Bhattacharya, *Snack Foods*, Academic Press, 2023, Pages 211-249, ISBN 9780128197592, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819759-2.00003-3>.

Tanaka, A., & Tanaka, R. (2019). The biochemistry, physiology, and evolution of the chlorophyll cycle. In *Advances in Botanical Research* (Vol. 90, pp. 183-212). Academic Press.

Vanajothi, R., Bhavaniramy, S., & Vishnupriya, S. (2022). Exploring the biostimulants in plant science. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 1-25). Elsevier.

Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., & Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339, 321-334.

Verma, A., Prasher, P., Sharma, M., Kumar, A., & Mudila, H. (2021). Zinc oxide nanoparticles: Physiological and molecular responses in plants. In *Zinc-Based Nanostructures for Environmental and Agricultural Applications* (pp. 339-365). Elsevier.

Yamuangmorn, S., Jumrus, S., Jamjod, S., Sringarm, K., & Arjin, C. (2022). Responses of purple rice variety to light intensities and soil zinc application on plant growth, yield and bioactive compounds synthesis. *Journal of Cereal Science*, 106, 103495.

Yang Z, McClements DJ, Xu Z, Meng M, Li C, Chen L, et al (2022) Carbohydrate-based functional ingredients derived from starch: Current status and future prospects. *Food Hydrocolloids*, 131: 107729. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107729>

Yaseen, A. A., & Takacs-Hajos, M. (2022). Evaluation of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaf extract on bioactive compounds of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under glasshouse environment. *Journal of King Saud University-Science*, 34(4), 101916.

Zhang, Y., & Goss, G. G. (2022). Nanotechnology in agriculture: Comparison of the toxicity between conventional and nano-based agrochemicals on non-target aquatic species. *Journal of Hazardous Materials*, 129559.

Zhao L, Sun Y, Hernandez-Viezcas JA, Servin AD, Hong J, Niu G, et al (2013) Influence of CeO₂ and ZnO Nanoparticles on Cucumber Physiological Markers and Bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(49): 11945-11951. <https://doi.org/10.1021/jf404328e>