







Efecto de maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc sobre biomasa y rendimiento en pepino

Effect of maltodextrin and zinc oxide nanoparticles on biomass and yield in cucumber

Omar Ucan-Tucuch¹ ,
Rebeca Betancourt-Galindo² ,
Antonio Juárez-Maldonado³ ,
Miriam Sánchez-Vega⁴ ,
Alberto Sandoval-Rangel⁵ ,
Alonso Méndez-López^{3*} 

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Maestría en Ciencias en Horticultura. Calzada Antonio Narro #1923. Buenavista. CP.25315. Saltillo, Coahuila, México.

²Centro de Investigación en Química Aplicada. Departamento de Materiales Avanzados. Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140. CP. 25294. Saltillo, Coahuila, México.

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Botánica. Calzada Antonio Narro #1923. CP. 25315. Buenavista. Saltillo, Coahuila, México.

⁴Cátedras CONACYT-UAAAN. Departamento de Parasitología. Calzada Antonio Narro #1923. Buenavista. CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

⁵Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Horticultura. Calzada Antonio Narro #1923. CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

* Autor de correspondencia:
alonso1977@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 12 de abril 2023

Aceptado: 07 de diciembre 2023

Como citar: Ucan-Tucuch O, Betancourt-Galindo R, Juárez-Maldonado A, Sánchez-Vega M, Sandoval-Rangel A, Méndez-López A (2023) Efecto de maltodextrina y nanopartículas de óxido de zinc sobre biomasa y rendimiento en pepino. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* Núm. Esp. III: e3699. DOI: 10.19136/era.a10nIII.3699

RESUMEN. El cambio climático y el crecimiento poblacional demandan nuevas y novedosas alternativas sustentables para mejorar el crecimiento y la producción de cultivos. 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 1 000 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. 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, entre ellos, principalmente, el cambio climático y el aumento de la población (Wang *et al.* 2023, Seppelt *et al.* 2022). Lo anterior, plantea retos en la maximización de la producción por unidad de área y la minimización del impacto ambiental en los sistemas de producción de cultivos. Una de las herramientas más prometedoras para hacer frente a estas crecientes preocupaciones es el uso de bioestimulantes vegetales (Mandal *et al.* 2023, Roupael *et al.* 2018). Los bioestimulantes son cualquier sustancia o microorganismos aplicados a la planta o la rizosfera con el objetivo de mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico, atributos de calidad del cultivo y/o rendimiento, independientemente de su contenido de nutrientes (Du Jardin 2015, González-González *et al.* 2020). Los bioestimulantes de plantas han ganado importancia debido a su potencial para aumentar la germinación, la productividad y la calidad de una amplia gama de cultivos hortícolas y agronómicos (Han *et al.* 2021). Recientemente, algunos estudios han aplicado nanopartículas como bioestimulantes de plantas (Singh *et al.* 2023, Kolbert *et al.* 2022). Las nanopartículas de óxido de zinc (NPZnO) alteran la síntesis de muchas hormonas, clorofila y metabolismo de carbohidratos en el curso del crecimiento de las plantas, por lo que se ha señalado que la NPZnO funcionan mejor que otro tipo de nanopartículas metálicas (Gilbertson *et al.* 2020, Zoufan *et al.* 2020). Se ha reportado que las NPZnO mejoran el crecimiento de plantas, rendimiento y calidad de fruto en cultivos como tomate, pepino y lechuga (Zhao *et al.* 2013, González-García *et al.* 2021, Méndez-López *et al.* 2022). Por otro lado, muchos bioestimulantes que contienen carbohidratos cuando son aplicados a las plantas pueden alterar el metabolismo al actuar directamente como fuente de energía o molécula de señalización (Brown y Saa 2015). La maltodextrina es un polisacárido derivado de la hidrólisis del almidón que se usa en múltiples áreas de la industria (Yang *et al.* 2022). Estudios recientes han demostrado un

efecto bioestimulante 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 (Baldoquin-Hernandez *et al.* 2015, Pérez-Velasco *et al.* 2020).

El pepino es una hortaliza ampliamente cultivada en todo el mundo, tanto en áreas abiertas como en invernaderos. En los países con clima templado durante el invierno, el pepino tiene un precio elevado debido a su escasez (Liu *et al.* 2021). Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2022), China es el principal productor mundial de pepino, mientras que México ocupa el quinto lugar en términos de volumen de producción. Los estados de Sinaloa, Sonora y Michoacán son los principales productores de pepino en México. Esto demuestra que el cultivo de pepino tiene un alto valor económico y agronómico en diversas regiones. Las investigaciones de cultivo del pepino pueden tener un impacto significativo en la rentabilidad y sustentabilidad de su producción, así como en la calidad y disponibilidad de los productos alimentarios relacionados. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar el efecto bioestimulante de la maltodextrina y las nanopartículas de óxido de zinc en el contenido de biomasa y los parámetros de rendimiento de las plantas de pepino en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se desarrolló en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno, acondicionado con pared húmeda y ventilación por medio de extractores, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. Las condiciones ambientales promedio dentro del invernadero durante el estudio fueron de Temperatura 23,2 °C, humedad relativa de 54%.

Manejo del cultivo

Se utilizaron semillas de pepino americano var. Centauro F1 (FitoSeeds). 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 en relación 1:1 (v/v). La siembra se hizo de forma directa colocando una semilla por maceta. La nutrición del cultivo se llevó a cabo por medio de la solución nutritiva Steiner (1961) modificada. Las fuentes de nutrientes utilizadas en la solución fueron: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, micro mix, ácido nítrico y ácido fosfórico. El pH se ajustó a 6.0 y la conductividad eléctrica se estabilizó en 2 dS m^{-1} en la solución terminada al 100%. El suministro a partir de los 15 días después de la emergencia fue a una dosis del 25%, ocho días posteriores se ajustó al 50% y, 15 días después se cambió al 100% hasta el final del cultivo. Las plantas se manejaron a un solo tallo con tutorado tipo holandés; el cultivo se mantuvo por 100 días para posteriormente cortar las plantas.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 5×2 , con un total de 10 tratamientos y ocho repeticiones cada uno. Se consideró una maceta como unidad experimental. La densidad de plantación fue de 2.8 plantas por metro cuadrado.

Aplicación de los tratamientos

Las nanopartículas se sintetizaron en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) en Saltillo, Coahuila, México. Las nanopartículas de óxido de zinc fueron sintetizadas por el método de precipitación usando acetato de zinc (O_2CCH_3)₂, etanol y agua desionizada. La modificación de la superficie de las nanopartículas de óxido de zinc se llevó a cabo utilizando una relación molar MDX:ZnO-NPs de 1:1 bajo el método de síntesis antes mencionado usando etanol como agente de dispersión (Pérez-Velasco *et al.* 2020, Hsieh 2007). La maltodextrina pura se obtuvo de una fuente comercial de grado reactivo (Sigma Aldrich, catálogo 419672), la maltodextrina refinada de grado alimenticio se obtuvo comercialmente de la empresa Manuchar Inc. Los tratamientos consistieron en maltodextrina pura (MDP), maltodextrina refinada (MDX), nanopartículas de óxido de zinc (NPZnO) y nanopartículas de óxido

de zinc recubiertas con maltodextrina (NPZnO-MDX), y un control (T0). Los tratamientos se aplicaron a una concentración de 1000 ppm por vía foliar y por vía drench. Las aplicaciones se iniciaron a los 15 días después de la emergencia y posteriormente cada 15 días hasta completar 5 aplicaciones.

Caracterización de las nanopartículas

La morfología y el tamaño de las nanopartículas de ZnO se obtuvieron mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Trasmisión, se observó una distribución homogénea con tamaños menores a 100 nm y morfología esférica. Mediante la difracción de rayos X (DRX) la estructura cristalina propia de las nanopartículas de óxido de zinc fue corroborada.

Variables evaluadas

Al finalizar el periodo de la evaluación, habiendo transcurrido 100 días después de la emergencia, se hizo un muestreo destructivo de las plantas para obtener las mediciones de peso fresco aéreo (PFA) y peso seco aéreo (PSA), así como peso fresco de raíz (PFR) y peso seco de raíz (PSR). Para ello, se procedió a pesar el material vegetativo fresco de la parte aérea con ayuda de una balanza digital COBACORP[®], modelo Bca. En cuanto al PFR, primeramente, se llevó a cabo un proceso de lavado de raíz para retirar el exceso de sustrato. Posteriormente se pesó a cada una 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. Durante la cosecha, los frutos obtenidos fueron trasladados al laboratorio. Ahí se tomó registro del NF y PF con una balanza digital COBACORP[®], modelo Bca, se registró el DPF con un flexómetro marca Truper[®] FH-55M, y el DEF con un vernier digital marca Truper[®], modelo CALDI-6MP de cada uno de los frutos de pepino cosechados por planta.

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de varianza y una prueba de comparación

de medias de LSD 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

La maltodextrina y las nanopartículas afectaron significativamente las variables de biomasa 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 significativamente el PSA, NF, DPF y DEF (Tabla 1).

En general, a excepción del PFR, la mayoría de los bioestimulantes evaluados superaron estadísticamente al T0 en los parámetros de producción de biomasa y parámetros de rendimiento de fruto (Tabla 1). Se observó diferencias estadísticas en el PFA, el mayor valor se obtuvo al aplicar MDP y MDX; en tanto que, el PSA, PF y DEF no mostraron diferencias significativas entre los bioestimulantes evaluados; mientras que, el PSR fue mayor con la aplicación de MDP, MDX y NPZnO-MDX; por su parte, el NF fue mayor cuando se aplicó MDP; en tanto que, el DPF fue mayor al aplicar MDX, NPZnO y NPZnO-MDX, principalmente cuando los bioestimulantes se aplicaron vía drench (Tabla 1).

El Análisis de varianza para la interacción de los factores en estudio (Tabla 1) mostró que los bioestimulantes y vía de aplicación evaluados promueven diferente efecto sobre el PSA (Figura 1). Todos los bioestimulantes presentaron mayor PSA con respecto al T0 correspondiente; sin embargo, la vía de aplicación mostro diferencias, debido que al tratar las plantas con MDP vía foliar el PSA fue superior que al aplicarlo vía drench; mientras que, al aplicar NPZnO el PSA fue mayor al aplicarlo vía drench; en tanto que, al tratar las plantas con MDX y NPZnO-MDX el PSA fue similar en las dos vías de aplicación (Figura 1).

Así mismo, la interacción de los factores estudiados (Tabla 1) indicaron que los bioestimulantes y vía de aplicación tuvieron diferente efecto sobre el NF (Figura 2). Al aplicar vía foliar los bioestimulantes se

observó que con MDP y NPZnO el NF fue significativamente superior al T0 correspondiente, superándolo por un 31.57 y 13.86%, respectivamente; en tanto que, en la aplicación vía drench todos los bioestimulantes superaron significativamente al T0 correspondiente, con un incremento del 27.20, 32.39, 12.98 y 20.76% (MDP, MDX, NPZnO y NPZnO-MDX), respectivamente. Así mismo, se observó que, dentro de los bioestimulantes evaluados, el NF fue mayor al aplicar MDP y MDX, esta última sólo vía drench.

La interacción de los factores en estudio (Tabla 1) mostró que los bioestimulantes y la vía de aplicación afectaron de forma diferente el DPF y DEF de pepino (Figura 3A y 3B). Se observó que todos los bioestimulantes presentaron un DPF significativamente superior que los T0 correspondientes; sin embargo, dentro de los bioestimulantes aplicados, el DPF fue significativamente superior al aplicar las NPZnO vía drench, con un incremento del 14.04% respecto al T0 correspondiente (Figura 3A). De igual forma, a excepción de la aplicación de MDP vía drench, todos los bioestimulantes presentaron un DEF significativamente superior al obtenido con los T0 correspondientes y, en promedio, fueron similares entre ellos; sin embargo, a diferencia del resto de los tratamientos evaluados, la vía de aplicación de MDP afectó significativamente el DEF, ya que se obtuvo un mayor DEF cuando se aplicó MDP vía foliar (Figura 3B).

DISCUSIÓN

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), logrando 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 (Sing *et al.* 2023, Juárez-Maldonado *et al.* 2019). Por otro lado, la maltodextrina es un polisacárido

Tabla 1. 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 (gr)	PSA (gr)	PFR (gr)	PSR (gr)	NF	PF (gr)	DPF (cm)	DEF (mm)
Bioestimulantes								
T0	442.88 ± 27.22 ^c	65.78 ± 2.30 ^b	59.00 ± 4.84 ^{ab}	3.49 ± 0.59 ^c	9.75 ± 0.68 ^c	301.54 ± 29.40 ^b	19.83 ± 0.65 ^c	47.79 ± 1.52 ^b
MDP	510.25 ± 32.79 ^a	79.86 ± 5.24 ^a	60.50 ± 11.59 ^a	4.98 ± 1.02 ^a	12.63 ± 1.36 ^a	341.39 ± 19.22 ^a	21.12 ± 0.69 ^b	49.61 ± 1.57 ^a
MDX	521.06 ± 44.8 ^a	80.29 ± 5.72 ^a	58.00 ± 5.54 ^{ab}	4.50 ± 0.77 ^{ab}	11.81 ± 1.37 ^b	343.09 ± 34.37 ^a	21.48 ± 0.84 ^{ab}	50.15 ± 1.95 ^a
NPZnO	457.19 ± 29.24 ^{bc}	79.89 ± 8.30 ^a	54.44 ± 6.59 ^b	3.95 ± 0.81 ^{bc}	11.06 ± 0.99 ^b	352.05 ± 29.22 ^a	21.79 ± 1.43 ^a	50.21 ± 2.27 ^a
NPZnO+MDX	479.06 ± 40.8 ^b	79.52 ± 6.81 ^a	61.63 ± 8.55 ^a	4.46 ± 0.89 ^{ab}	11.06 ± 1.18 ^b	347.95 ± 24.56 ^a	21.50 ± 0.91 ^{ab}	50.38 ± 1.61 ^a
ANOVA	0.0001	0.0001	0.0484	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Vía de aplicación								
Foliar	479.88 ± 48.71 ^a	76.60 ± 8.64 ^a	59.38 ± 7.77 ^a	4.40 ± 1.00 ^a	11.10 ± 1.48 ^a	333.08 ± 34.53 ^a	20.97 ± 1.05 ^b	49.62 ± 2.09 ^a
Drench	484.30 ± 43.50 ^a	77.14 ± 7.63 ^a	58.05 ± 8.28 ^a	4.15 ± 0.91 ^a	11.43 ± 1.46 ^a	341.33 ± 30.71 ^a	21.32 ± 1.24 ^a	49.63 ± 1.95 ^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 diferentes significan diferencia significativa entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

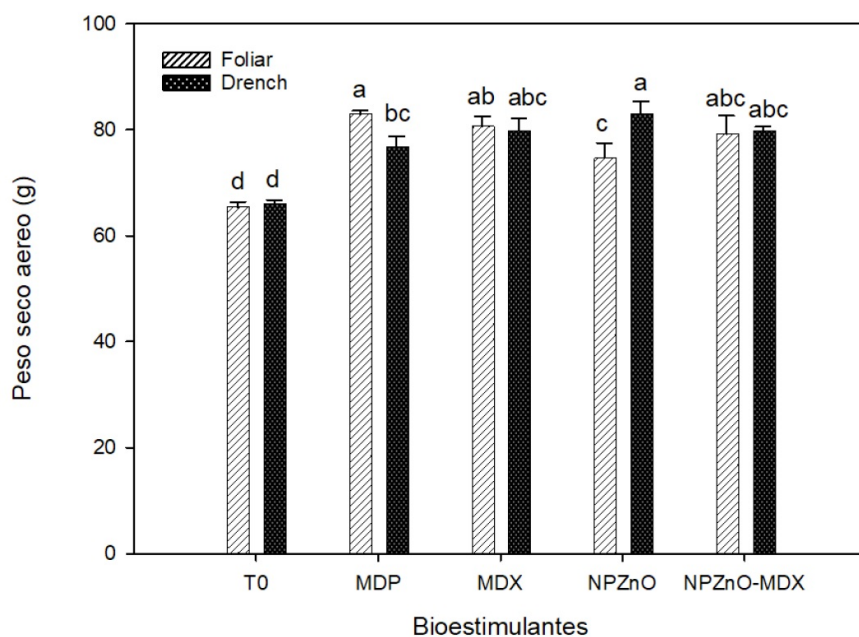


Figura 1. Peso seco aéreo de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

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, lo que puede confirmarse con lo encontrado en nuestro trabajo. 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 ayudando a ser más eficiente el mecanismo fo-

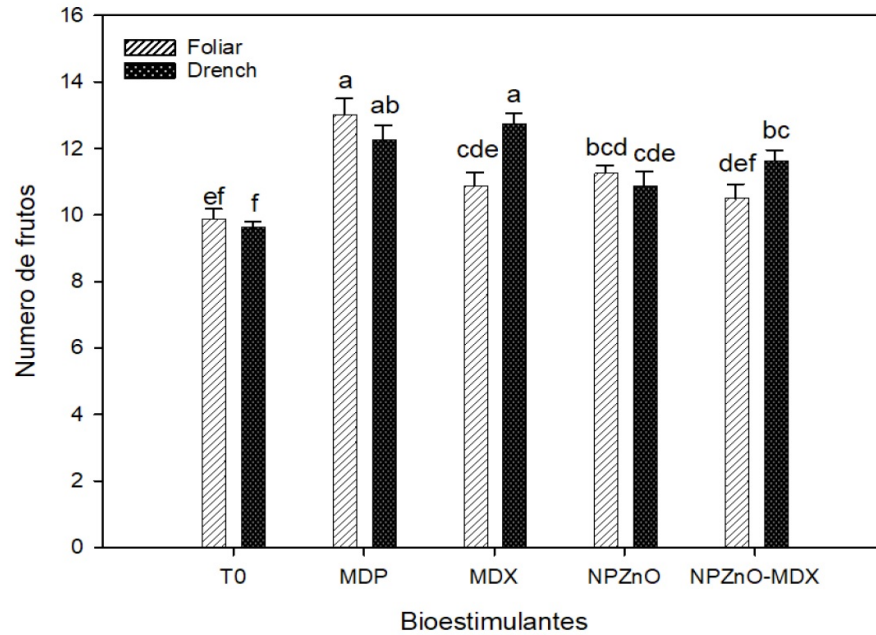


Figura 2. Número de frutos de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

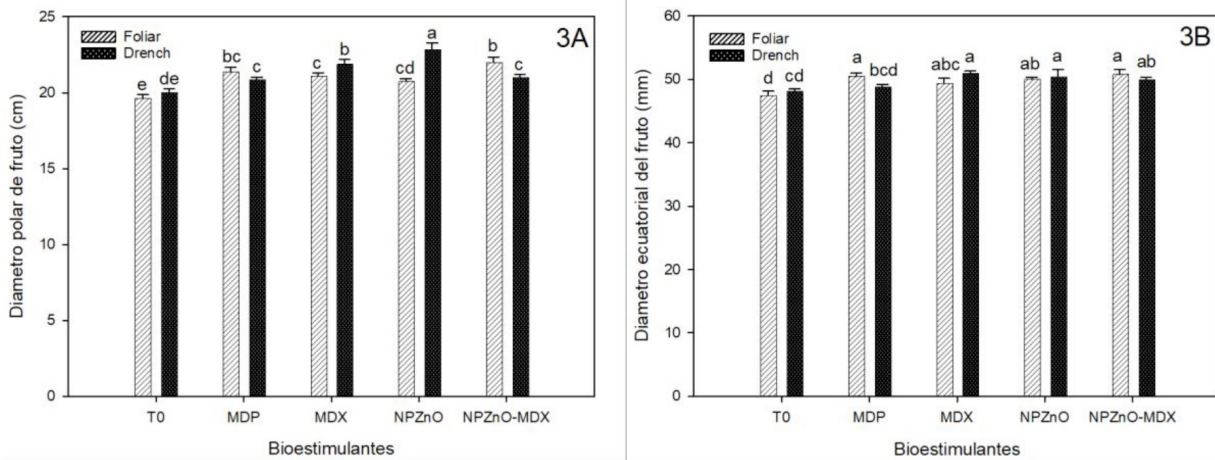


Figura 3. Diámetro polar del fruto (3A) y diámetro ecuatorial del fruto (3B) de plantas de pepino tratadas con maltodextrina y nanopartículas en diferentes vías de aplicación. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

tosintético 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 posi-

tivo 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 menor producción de biomasa de las plantas de pepino. 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 puede explicar 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 no concuerdan 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, esto pudo deberse a la mayor concentración utilizada en nuestro trabajo; 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) señala que efecto positivo o negativo de los bioestimulantes vegetales dependerá de la especie vegetal, la concentración, características del bioestimulante y la vía de aplicación.

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 el tamaño del fruto (Di Vittori *et al.* 2018). Los bioestimulantes vegetales debido a que tienen la capacidad de modificar los procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis, proporcionan beneficios potenciales para mejorar el desarrollo del fruto (Farouk 2023, 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). 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 a 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 mg L⁻¹ de NPZnO vía foliar observó un incremento del número de vainas, peso de mil semillas y el rendimiento de lenteja.

CONCLUSIONES

La aplicación de maltodextrina y nanopartículas, tuvo efectos bioestimulante incrementando la acumulación de biomasa y mejorando los parámetros de rendimiento en las plantas de pepino. La MDP suministrada por ambas vías de aplicación y la MDX vía drench incrementan el número de frutos por planta; las NPZnO vía drench incrementaron el DPF. Las NPZnO sin recubrimiento a dosis de 1 000 ppm tuvieron efectos negativos en la producción de biomasa de las plantas de pepino. La información disponible sobre los efectos benéficos de la maltodextrina como promotor de crecimiento en plantas es limitado, por lo que, los resultados encontrados en este trabajo pueden ayudar 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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por el financiamiento del proyecto interno con clave: 38111-425104001-2349. Al Consejo

Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al autor principal de este manuscrito para realizar estudios de Maestría.

LITERATURA CITADA

- Baldoquin-Hernández M, García MA, Gómez-Masjuan Y, Bertot Arosa IJ (2015) Respuesta agronómica del cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Black Seed Simpson ante la aplicación de bioestimulante Enerplant. *Revista Centro Agrícola* 42: 55-59.
- Brown P, Saa S (2015) Biostimulants in agriculture. *Frontiers in plant science* 6: 671. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.
- 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137808.
- Du Jardin P (2015) Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* 196: 3-14.
- 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. DOI: 10.3390/app9030499.
- Farouk S (2023) Role of biostimulants in plant's life cycle. In *Biostimulants in Alleviation of Metal Toxicity in Plants* (pp. 75-106). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-323-99600-6.00010-4.
- 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.
- Gilbertson LM, Pourzahedi L, Laughton S, Gao X, Zimmerman JB, Theis TL, Westerhoff P, Lowry GV (2020) Guiding the design space for nanotechnology to advance sustainable crop production. *Nature Nanotechnology* 15: 801-810.
- 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. In: Ingle AP (ed) *Nanotechnology in plant growth promotion and protection*. John Wiley & Sons, Ltd. India. pp: 129-169.
- González-González MF, Ocampo-Alvarez H, Santacruz-Ruvalcaba F, Sánchez-Hernández CV, Casarrubias-Castillo K, Becerril-Espinosa A, Castañeda-Nava JJ, Hernández-Herrera RM (2020) Physiological, ecological, and biochemical implications in tomato plants of two plant biostimulants: Arbuscular mycorrhizal fungi and seaweed extract. *Frontiers in Plant Science* 11: 999. DOI: 10.3389/fpls.2020.00999.

- 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: Fernandes-Fraceto L, Pereira-de-Carvalho HW, de Lima R, Ghoshal S, Santaella C (eds) *Inorganic nanopesticides and nanofertilizers*. Springer, Cham. pp: 153-185. DOI: 10.1007/978-3-030-94155-0_5.
- Han X, Xi Y, Zhang Z, Mohammadi MA, Joshi J, Borza T, Wang-Pruski G (2021) Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in *Solanum tuberosum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 210: 111873. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111873.
- Hsieh CH (2007) Spherical zinc oxide nano particles from zinc acetate in the precipitation method. *Journal of the Chinese Chemical Society* 54: 31-34.
- Juárez-Maldonado A, Ortega-Ortiz H, Morales-Díaz AB, González-Morales S, Morelos-Moreno Á, Cabrera-De la Fuente M, Sandoval-Rangel A, Cadenas-Pliego G, Benavides-Mendoza A (2019) Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences* 20(1): Art. 1. DOI: 10.3390/ijms20010162.
- 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.
- Kolbert Z, Szöllösi R, Rónavári A, Molnár Á (2022) Nanoforms of essential metals: from hormetic phytoeffects to agricultural potential. *Journal of Experimental Botany* 73: 1825-1840.
- Kolenčík M, Ernst D, Komár M, Urík M, Šebesta M, Ďurišová L, Bujdos M, Černý I, Chlpiík 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. DOI: 10.3390/nano12030310.
- Liu H, Yin C, Gao Z, Hou L (2021) Evaluation of cucumber yield, economic benefit and water productivity under different soil matric potentials in solar greenhouses in North China. *Agricultural Water Management* 243: 106442. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106442.
- Lolodi O (2011) Microencapsulation of colistin sodium methanesulfonate in gum arabic and maltodextrin by spray drying. *Trends in Applied Sciences Research* 6(8): 877. LINK: <https://scialert.net/abstract/?doi=tasr.2011.877.889>.
- Mandal S, Anand U, López-Bucio J, Kumar M, Lal MK, Tiwari RK, Dey A (2023) Biostimulants and environmental stress mitigation in crops: A novel and emerging approach for agricultural sustainability under climate change. *Environmental Research*, 116357. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116357.
- Méndez-López A, González-García Y, Juárez-Maldonado (2022) Stimulatory role of nanomaterials on agricultural Mansourcrops. Mansour Ghorbanpour, Muhammad Adnan Ahahid. *Nano-enabled Agrochemicals in Agriculture*. Academic Press. India. pp: 219-246.
- Omoarelojie LO, Kulkarni MG, Finnie JF, Van Staden J (2021) Modes of action of biostimulants in plants. In: Gupta S, Van Ataden J (ed) *Biostimulants for crops from seed germination to glant development*. Academic Press. India. pp: 445-459.
- 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. DOI: 10.3390/molecules25061282.

- 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: 791-803.
- Rouphael Y, Giordano M, Cardarelli M, Cozzolino E, Mori M, Kyriacou MC, Bonini P, Colla G (2018) Plant-and seaweed-based extracts increase yield but differentially modulate nutritional quality of greenhouse spinach through biostimulant action. *Agronomy* 8(7): 126. DOI: 10.3390/agronomy8070126.
- Seppelt R, Klotz S, Peiter E, Volk M (2022) Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. *IScience* 25(12): 105551. DOI: 10.1016/j.isci.2022.105551.
- SIAP (2022) Panorama Agroalimentario 2022. Servicio de Información agroalimentaria y Pesquera. México. 215p.
- Singh Y, Kumar U, Panigrahi S, Balyan P, Mehla S, Sihag P, Sagwal V, Singh KP, White JC, Dhankher OP (2023) Nanoparticles as novel elicitors in plant tissue culture applications: Current status and future outlook. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108004. DOI: doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108004.
- Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154.
- Wang T, Sun C, Yang Z (2023) Climate change and sustainable agricultural growth in the sahel region: Mitigating or resilient policy response?. *Heliyon* 9(9). DOI: 0.1016/j.heliyon.2023.e19839.
- Yang Z, McClements DJ, Xu Z, Meng M, Li C, Chen L, Qiu C, Long J, Jin Z (2022) Carbohydrate-based functional ingredients derived from starch: Current status and future prospects. *Food Hydrocolloids* 131: 107729. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107729.
- Zhao L, Sun Y, Hernandez-Viezcas JA, Servin AD, Hong J, Niu G, Peralta-Videga JR, Duarte-Gardea M, Gardea-Torresdey JL (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: 11945-11951.
- Zoufan P, Baroonian M, Zargar B (2020) ZnO nanoparticles-induced oxidative stress in *Chenopodium murale* L, Zn uptake, and accumulation under hydroponic culture. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 11066-11078.