

## RESPUESTA AGRONÓMICA A NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO E INDICADORES DE CALIDAD EN FRUTOS DE PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

### AGRONOMIC RESPONSE TO CHITOSAN NANOPARTICLES AND QUALITY INDICATORS IN CUCUMBER FRUITS (*Cucumis sativus* L.)

Juan J. Reyes Pérez<sup>1a</sup>, Luis T. Llerena Ramos<sup>1b</sup>, Eduardo I. Jerez Mompie<sup>2</sup>, Oscar F. López Ortega<sup>3</sup>, Eduardo F. Quinatoa-Lozada<sup>4</sup> y Bernardo Espinosa-Palomeque<sup>5\*</sup>

<sup>1a</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Av. Quito km 1.5 vía a Santo Domingo, Quevedo 120501, Los Ríos, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0001-5372-2523>

<sup>1b</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Av. Quito km 1.5 vía a Santo Domingo, Quevedo 120501, Los Ríos, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0001-8927-7417>

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Carretera San José-Tapaste, Km 3½, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba  
<https://orcid.org/0000-0001-6509-8932>

<sup>3</sup> Investigador Independiente, Quevedo, 120501, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0001-5760-8533>

<sup>4</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná. Av. Los Almendros y Pujilí, Sector La Virgen. 050201. La Maná, Cotopaxi, Ecuador  
<https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-0552-1871>

<sup>5</sup> Universidad Tecnológica de Escuinapa. Camino al Guasimal S/N, CP. 82400. Escuinapa de Hidalgo, Sinaloa, México  
<https://orcid.org/0000-0001-6294-024X>

\* Autor para correspondencia: [bspinosa@utescuinapa.edu.mx](mailto:bspinosa@utescuinapa.edu.mx)

#### RESUMEN

El cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) ha adquirido importancia en la agricultura a nivel mundial, tanto por su contribución económica como por su valor nutricional, lo cual genera una fuente de ingreso sostenible y fomenta la diversidad de los sistemas agrícolas. El uso de quitosano en la agricultura representa una estrategia innovadora y sostenible, al promover el crecimiento vegetal, mejorar la salud del suelo y reducir la dependencia de agroquímicos, contribuyendo así a una producción de alimentos más segura y ambientalmente responsable. El objetivo de la presente investigación consistió en determinar las respuestas de las plantas de pepino a la aplicación de nanopartículas de quitosano. Las concentraciones aplicadas fueron 1.000 mg L<sup>-1</sup> (T-1), 1.500 mg L<sup>-1</sup> (T-2), 2.500 mg L<sup>-1</sup> (T-3) y control (T-4), las cuales se distribuyeron un diseño de bloques al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Se evaluaron diferentes variables del crecimiento de las plantas: altura y diámetro del tallo, largo de la raíz, número de hojas y zarcillos, y número de flores, así como la producción de masa fresca y seca de diferentes órganos de las plantas. Al final del ciclo, se evaluó el rendimiento y la calidad nutracéutica de los frutos, al determinar en la pulpa los contenidos de polifenoles, flavonoides, capacidad antioxidante y sólidos solubles totales. Las

aplicaciones en sus distintas concentraciones de quitosano favorecieron el crecimiento, en general, de las plantas, aunque no todas las variables respondieron de la misma forma. La concentración 2.500 mg L<sup>-1</sup> incrementó el rendimiento, así como la calidad nutracéutica de los frutos.

**Palabras clave:** crecimiento, calidad nutracéutica, rendimiento, flores, tamaño frutos, zarcillos.

## ABSTRACT

The cultivation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) has acquired importance in agriculture globally, both for its economic contribution and nutritional value, which generates a sustainable source of income and encourages the diversity of agricultural systems. The use of chitosan in agriculture represents an innovative and sustainable strategy, promoting plant growth, improving soil health and reducing dependence on agrochemicals, thus contributing to safer and more environmentally responsible food production. The objective of this research was to determine the responses of cucumber plants to the application of chitosan nanoparticles. The applied concentrations were 1,000 mg L<sup>-1</sup> (T-1), 1,500 mg L<sup>-1</sup> (T-2), 2,500 mg L<sup>-1</sup> (T-3), and a control (T-4), which were distributed in a random block design with four treatments and three replications. Different plant growth variables were evaluated: stem height and diameter, root length, number of leaves and tendrils, and number of flowers, as well as the production of fresh and dry matter from different plant organs. At the end of the growing cycle, the yield and nutraceutical quality of the fruits were assessed by determining the contents of polyphenols, flavonoids, antioxidant capacity, and total soluble solids in the pulp. Applications of chitosan at different concentrations promoted overall plant growth, although not all variables responded equally. The concentration of 2,500 mg L<sup>-1</sup> increased both yield and nutraceutical quality of the fruits.

**Keywords:** growth, nutraceutical quality, yield, flowers, fruit size, tendrils.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) ha sido objeto de numerosos estudios que destacan su relevancia económica y nutricional, por lo que se ha consolidado como una fuente crucial de ingresos para agricultores a nivel mundial (Okwuokenye, 2020). Algunas investigaciones (Akhi e Islam, 2020) señalan la importancia del pepino como una valiosa fuente de vitaminas y antioxidantes en la dieta humana, lo que contribuye a mejorar la salud (Sharma et al., 2020). Esos resultados respaldan la posición clave del pepino en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola (Allard et al., 2020; Rebollar et al., 2022). En Ecuador, el cultivo de pepino ha adquirido una importancia en la agricultura, tanto por su contribución económica, como por su valor nutricional, por lo que se ha convertido en un cultivo rentable para los agricultores ecuatorianos con un área cosechada de 587 ha, rendimiento de 8.172,2 kg ha<sup>-1</sup> y producción total de 4.795,79 t (FAOSTAT, 2024).

Por otra parte, la aplicación de quitosano en la agricultura es una estrategia para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El quitosano, es un polisacárido derivado de la quitina, que ha demostrado propiedades antimicrobianas y antifúngicas, lo que lo convierte en un agente para el control de

fitopatógenos en plantas (Singh et al., 2022) como lo es el caso de otros nanomateriales, con una eficiencia probada en ese sentido (Jabran et al., 2024).

El quitosano mejora la resistencia de las plantas al inducir respuestas de defensa y contribuye a la salud del suelo al favorecer la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana, lo que respalda su uso como herramienta sostenible en el manejo de enfermedades y el aumento del rendimiento agrícola (Chakraborty et al., 2020; Torres et al., 2021; Sun et al., 2023). La aplicación de nanopartículas en la agricultura ha suscitado un creciente interés, debido a sus potenciales beneficios en diversos aspectos del rendimiento de los cultivos y la sostenibilidad agrícola (Gokul et al., 2023; Mohamed y Abdel 2023). La integración de nanopartículas de quitosano en la agricultura, también ha despertado un interés, debido a las propiedades únicas de este polisacárido derivado de la quitina (Sangwan et al., 2023).

Se ha demostrado el potencial antimicrobiano de las nanopartículas de quitosano para inhibir el crecimiento de fitopatógenos y mejorar la resistencia a enfermedades en las plantas (Tarakanov et al., 2023). Además, se ha examinado el efecto positivo de las nanopartículas de quitosano en la absorción de nutrientes por las plantas, demostrando que estas nanopartículas pueden actuar como vehículos eficientes para

la entrega controlada de nutrientes esenciales (Ha et al., 2019). A su vez, diversos estudios han resaltado el potencial de las nanopartículas de quitosano para mejorar las propiedades del suelo, particularmente al incrementar su capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que puede favorecer la disponibilidad de estos recursos para las plantas y, en consecuencia, optimizar su desarrollo (Kubavat et al., 2020; Chouhan y Manda 2021; Balusamy et al., 2022).

Por consiguiente, la utilización de nanopartículas de quitosano en la agricultura podría ser una estrategia prometedora para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas y la eficiencia de los sistemas agrícolas (Hidangmayum y Dwivedi 2022; Ingle et al., 2022), así como también la disminución de la fertilización sintética, debido a la sanidad de los cultivos y la mejora en el sistema radical (Tambo et al., 2023, Aguirre et al., 2024). La aplicación de nanopartículas de quitosano podría inducir efectos en el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales, y mejorar la fisiología y estimular los mecanismos de defensa de las plantas. Bajo la perspectiva anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar las respuestas de plantas de pepino a la aplicación de nanopartículas de quitosano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en invernadero del Campus Experimental “La María” ubicado en el km 7,5 de la vía Quevedo–Mocache en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador; la ubicación geográfica es 1°04'48.6" latitud Sur y 79°30'04.2" longitud Oeste, a una altitud de 75 metros sobre el nivel del mar.

Se utilizó un diseño de bloques al azar, con tres repeticiones y cuatro tratamientos, tres a base de nanopartículas (NPs) de quitosano (grado reactivo Sigma Aldrich): 1.000, 1.500 y 2.500 mg L<sup>-1</sup> de concentración de NPs y un control, en el que se aplicó agua destilada. Cada unidad experimental estuvo conformada por 20 plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.), del cultivar Diamante F1.

Las aplicaciones de NPs de quitosano fueron dirigidas a las hojas, realizando tres aplicaciones, a los 15, 25 y 35 días después del trasplante (DDT), las dosis utilizadas de NPs se obtuvieron al realizar las siguientes mezclas de quitosano con agua: el de 1.000 mg L<sup>-1</sup>, con 70 mL de agua y 30 mL de NPs; el de 1.500 con 50 mL de agua y 50 mL de NPs; y el de 2.500, con 40 mL de agua y 60 mL de NPs de quitosano, respectivamente.

Las plantas provenientes del semillero, se trasplantaron cuando tenían tres hojas verdaderas en recipientes que contenían 2 kg de

sustrato conformado de suelo agrícola y compost de vacuno, en una proporción 3:1, debidamente homogeneizado y suplementando con fertilizante comercial Yaramilla (2021) a razón de 50 g, posteriormente se aplicaron 25 g por planta en la etapa de desarrollo y producción del cultivo aplicado cada 25 días después del trasplante.

El riego se realizó tres veces por semana mediante un sistema de riego localizado por goteo, con un gotero colocado en cada recipiente y una entrega de 1,5 L h<sup>-1</sup>. El tiempo de riego fue de tres horas hasta inicio de floración y cuatro horas a partir de ese momento. De esta manera el volumen de agua aplicado semanalmente por planta, fue de 14 L en el primer estadio considerado y 18 L en el segundo. Al tener en cuenta la cantidad de plantas por ha, de acuerdo al marco de plantación (0,50 × 1,0 m), se estimaron las normas de riego aplicadas, que fueron de 280 y 360 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente, lo que indica que las láminas de agua fueron en el primer caso 28 mm y 36 mm en el segundo. De esta manera se garantizó que las plantas no sufrieran de estrés hídrico.

El tutoreo de las plantas, quedó establecido al colocar en cada extremo de las hileras una estaca, a partir de la cual se extendieron dos líneas de alambre en la parte superior de las plantas a una altura de 3 m y separadas 20 cm entre ellas, en las cuales se sujetaron cuidadosamente las plantas en la medida que fueron ganando en altura. Semanalmente se realizaron podas de hojas basales, enfermas y de nuevas yemas axilares, con la finalidad de equilibrar la planta al tallo principal.

## Evaluaciones de crecimiento

En diez plantas al azar de cada tratamiento y repetición, se realizaron mediciones de la altura de las plantas a los 25, 40 y 55 DDT, con cinta de medir, desde el nivel del suelo hasta la yema apical y del diámetro del tallo en su punto medio, con un pie de rey marca Mitutoyo 530, mientras que a los 40 y 55 DDT, se contaron el número de hojas y zarcillos presentes. Al momento del inicio de la floración a los 45 DDT, se contaron el total de flores masculinas y femeninas en cada planta.

Otras variables del crecimiento evaluadas, consistieron en la determinación de la masa fresca y seca de raíz, tallos y hojas, para lo cual se utilizaron cinco plantas por tratamiento de cada repetición. Las plantas al ser colectadas se separaron en los diferentes órganos que fueron pesados en una balanza digital marca Sartorius, para conocer la masa fresca y luego cada muestra se introdujo en bolsa de papel y se colocaron en estufa (Marca FED 115) de circulación forzada a 65 °C por 72 h, para obtener su masa seca.

Al final del ciclo del cultivo, se extrajeron diez plantas por tratamiento y por repetición, para medir el largo de la raíz, desde el cuello de la misma hasta el meristemo apical.

### Rendimiento

El rendimiento se determinó por la sumatoria de dos colectas realizadas de 10 plantas por tratamiento en cada repetición, luego de obtener la masa fresca total en g, se expresó como  $\text{kg ha}^{-1}$ , a partir del marco de siembra para pepino, que en este caso fue de 0,50 m por 1,0 m.

### Tamaño del fruto

Esta determinación se realizó en 20 frutos por tratamiento y repetición tomados al azar y se midió a cada uno, el largo con una cinta y su diámetro, con un vernier.

### Calidad nutracéutica de los frutos

Para conocer la calidad de los frutos, se realizaron las extracciones correspondientes a partir de cinco frutos por tratamiento y repetición. El contenido de flavonoides totales se determinó usando el método colorimétrico propuesto por Zhishen et al. (1999). La absorbancia se midió inmediatamente a 510 nm usando un espectrofotómetro. Los resultados obtenidos se expresaron en mg de equivalentes de catequina por g peso fresco. El contenido de fenoles se determinó con el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu (Singleton et al. 1999). Los fenoles totales se determinaron utilizando una curva de calibración de ácido gálico y se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por g peso fresco. La capacidad antioxidante se midió mediante el método de Henríquez et al. (2002), se utilizó una curva estándar de Trolox (Sigma-Aldrich) y los resultados se presentaron en micromoles ( $\mu\text{M}$ ) de Trolox por gramo de peso fresco ( $\mu\text{M equiv Trolox g}^{-1}$ ). Los sólidos totales (SST) se expresaron en °Brix del jugo fresco. La medición se realizó colocando una gota de jugo filtrado en el prisma de un refractómetro digital con compensación automática de temperatura (Atago PR-100 NSG Precision Cells, Inc., Framingdale, NY).

### Análisis estadístico

Una vez comprobada la normalidad de los datos y homogeneidad de las varianzas, se procedió a realizar los análisis de varianza correspondientes en cada variable evaluada, mediante el empleo del Programa estadístico SPSS v.24; las medias de los tratamientos, se compararon por la prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$  y los resultados se graficaron con el empleo del programa SigmaPlot v.14.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El crecimiento en altura y diámetro del tallo se presenta en la Fig. 1A y 1B, respectivamente. Los efectos de los tratamientos de NPs de quitosano, fueron más evidentes en la variable diámetro del tallo, aunque en ambas variables en el tratamiento control se alcanzaron los menores valores.

En la altura de las plantas, los tratamientos en que se aplicaron las diferentes concentraciones de NPs de quitosano, no mostraron diferencias significativas entre ellos, aunque en el caso de la variable diámetro del tallo las concentraciones más altas, fueron las que, en los tres momentos evaluados alcanzaron los mayores valores, con diferencias significativas respecto al tratamiento control (Fig. 1B).

Las aplicaciones foliares de quitosano promovieron un mayor crecimiento vegetativo, mejoraron la calidad del fruto y redujeron la incidencia de enfermedades en plantas de pepino, en comparación con el control. Estos efectos positivos pueden atribuirse a la acción bioestimulante y elicitor del quitosano, que favorece la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y la inducción de defensas (Sharif, 2018).

Al analizar el crecimiento del largo de la raíz (Fig. 2), resultó que el tratamiento control (T-4) no mostró diferencias significativas con ninguno de los tratamientos en que se aplicó las concentraciones de NPs de quitosano. Concentraciones altas de nanopartículas de quitosano han mostrado efectos duales en el sistema radical, caracterizados por una inhibición del crecimiento de la raíz principal y, paralelamente, una mayor formación de raíces seminales. Este efecto ha sido atribuido a la estimulación de la síntesis de fitohormonas y a la activación de genes relacionados con la defensa vegetal, lo que ha sido documentado en diversos cultivos como tomate, arroz, trigo, sorgo y salicornia (Ramírez et al., 2021).

En las tres variables de crecimiento analizadas anteriormente, no se presentó un comportamiento similar en cuanto al efecto de las NPs de quitosano, lo cual indica que la respuesta podría estar influenciada por el momento en que se realizaron las evaluaciones, ya que, en el caso del largo de la raíz, la evaluación se realizó al final del ciclo del cultivo y las otras dos en la fase vegetativa e inicio de la reproductiva. Se recomienda la aplicación del quitosano en el sistema radical de las plantas mediante su incorporación al suelo, la fertirrigación diaria o su adición a soluciones nutritivas, como métodos viables para asegurar una mayor absorción y obtener respuestas fisiológicas más consistentes en las raíces (Suwanchaikasem et al., 2024).

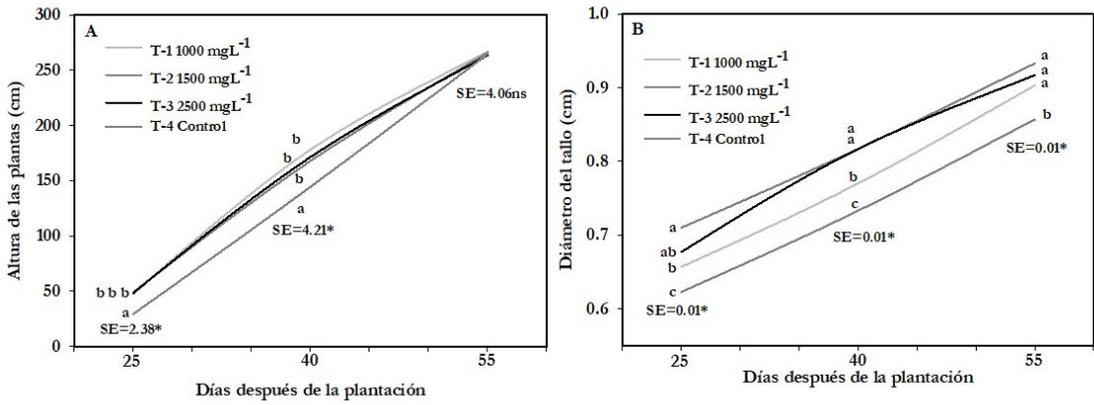


Fig. 1. Dinámicas de la altura de las plantas (A) y diámetro del tallo (B). Letras diferentes en cada momento de evaluación significan diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 1. Dynamics of plant height (A) and stem diameter (B). Different letters at each evaluation time indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

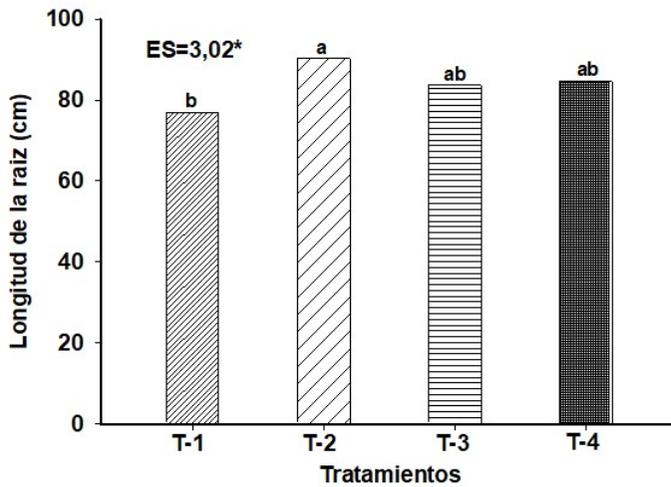


Fig. 2. Largo de la raíz al final del ciclo de cultivo. (T-1=1.000 mg L<sup>-1</sup>; T-2=1.500 mg L<sup>-1</sup>; T-3=2.500 mg L<sup>-1</sup> y T-4=Control). Letras diferentes encima de las barras, significan diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 2. Root length at the end of growing cycle (T-1=1,000 mg L<sup>-1</sup>; T-2=1,500 mg L<sup>-1</sup>; T-3=2,500 mg L<sup>-1</sup> and T-4=Control). Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

No obstante, las aplicaciones de NPs de quitosano, mejoran significativamente el funcionamiento fisiológico de las plantas, incluida la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, lo cual repercute en un mejor comportamiento en general de las plantas, además de que se han utilizado para otros beneficios, como promover el crecimiento, principalmente (Sangwan et al., 2023), porque las nanopartículas son más eficientes que otros bioproductos a base de estas moléculas, pues tienen pesos moleculares

menores, una biodisponibilidad mejorada, una vida media más larga y una mayor relación área superficial/volumen (Ingle et al., 2022).

En términos generales, las NPs de quitosano pueden estimular la altura de planta, diámetro de tallo y la longitud de raíz de las plantas al contener pequeñas cantidades de nutrientes como C, O, N y P, además de estimular positivamente la división y elongación celular, la activación de enzimas y la síntesis de proteínas, lo que conlleva a un aumento de la calidad y productividad de

los cultivos (Chakraborty et al., 2020; Prajapati et al., 2022).

En las variables número de hojas y número de zarcillos por planta (Fig. 3A y 3B, respectivamente), los efectos de la aplicación de las NPs de quitosano se observaron con mayor significancia en la segunda evaluación, cuando ya se habían realizado dos aplicaciones del bioproducto.

A los 25 y 40 días después del trasplante, no se encontraron diferencias significativas entre las tres concentraciones de NPs empleadas, al igual que en la primera evaluación en las variables número de hojas y zarcillos por planta; sí se observó diferencias con respecto al control, que mostró los menores valores en ambas variables. El porcentaje de incremento respecto al control a los 40 DDT, resultó de un 19% para el número de hojas y 25% para el número de zarcillos.

El número de hojas es una variable de gran importancia, debido a su implicación directa en la superficie foliar de la planta, y por supuesto, en la actividad fotosintética. Es de esperar que una superficie foliar mayor, propicie una mayor producción de biomasa, aunque esto dependerá de la traslocación de fotosintatos que ocurra. Se ha comprobado que un mayor número de hojas es asociado a una mayor eficiencia del uso del agua y, por ende, de la producción en plantas de pepino (Félix et al., 2024; Yomira et al., 2025).

En cuanto al número de zarcillos, su comportamiento fue similar al número de hojas, se debe a que en cada nudo del tallo se produce una hoja y un largo zarcillo que se considera una hoja modificada, adaptada para sujetar a la planta en su hábito de trepadora (Li et al., 2022), por lo que se puede inferir una relación directa entre

ambas variables. A diferencia de lo observado en la masa fresca de distintos órganos de la planta, en la raíz no se registraron diferencias significativas entre tratamientos, como sí ocurrió en la longitud de ésta. No obstante, se detectaron diferencias significativas en la biomasa del tallo y las hojas, donde en ambos órganos se observó una disminución en función del aumento en las concentraciones aplicadas (Fig. 4).

La menor cantidad de masa seca se observó en el siguiente orden: raíz, hojas y tallos, lo cual es de esperarse, si se considera que el órgano especializado para la traslocación de los fotosintatos es el tallo, ya que posee la mayor cantidad de tejido vascular.

Por otra parte, en la producción de masa seca en los diferentes órganos considerados (Fig. 5) no se manifestó el mismo comportamiento, seguido por la masa fresca, excepto en la raíz donde fue igual, es decir, los tratamientos aplicados no modificaron los contenidos de masa seca. En cuanto al tallo, la menor concentración de NPs de quitosano disminuyó la producción de masa seca, incluso, por debajo del control, con diferencias significativas respecto a los otros tratamientos. El quitosano puede actuar como bioestimulante, pero su efecto puede depender de la concentración y la masa molecular; concentraciones bajas o ciertas masas moleculares pueden no estimular, o incluso reducir, la masa seca en el tallo al no activar suficientemente los procesos metabólicos o al afectar negativamente la absorción de nutrientes. En relación a la variable masa seca de las hojas las concentraciones más bajas (1.000 y 1.500 mg L<sup>-1</sup>) de NPs de quitosano propiciaron los mayores contenidos de masa seca, respecto al control y a la concentración más elevada (2.500

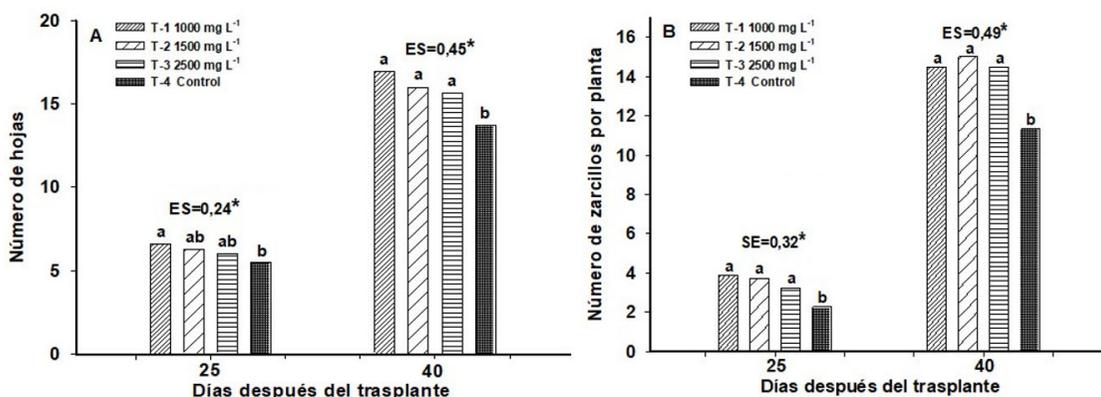


Fig. 3. Número de hojas (A) y zarcillos (B) en dos etapas después del trasplante. Letras diferentes encima de las barras, significan diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 3. Numbers of leaves (A) and tendrils (B) at two time points after transplantation. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

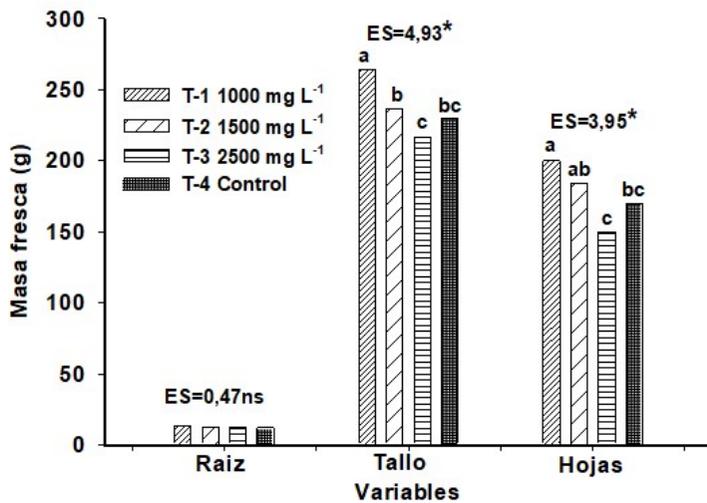


Fig. 4. Masa fresca en diferentes órganos al final del ciclo del cultivo. Letras diferentes encima de las barras, significan diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 4. Fresh mass in different organs at the end of the growing cycle. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

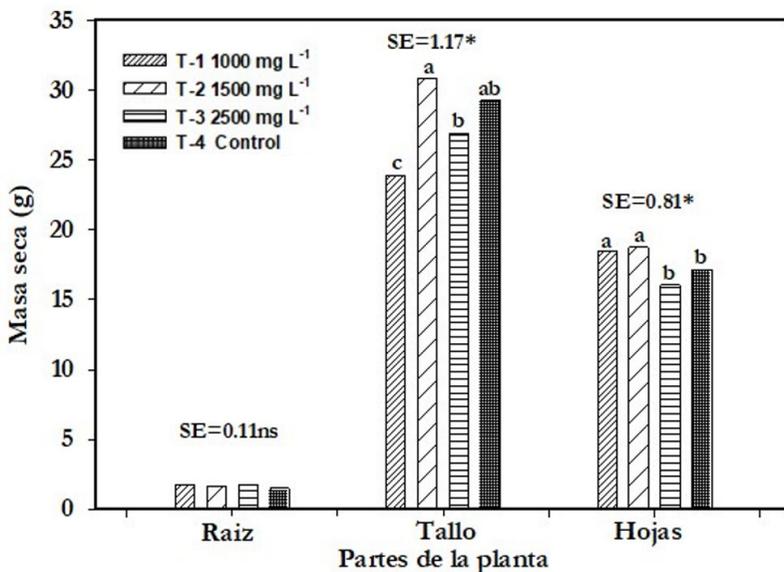


Fig. 5. Masa seca en diferentes órganos al final del ciclo del cultivo. Letras diferentes encima de las barras, significan diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 5. Dry mass in different organs at the end of the growing cycle. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

mg L<sup>-1</sup>), mientras que en estos dos tratamientos no se reflejaron diferencias significativas entre ellos.

Los resultados analizados en las variables masa fresca y seca de diferentes órganos en plantas de pepino, no resultaron totalmente similares, en cuanto al efecto de los tratamientos de NPs de quitosano, todo lo cual apunta en que es necesario

encontrar cantidades (dosis) o concentraciones óptimas para la aplicación de nanomateriales, de manera que mejoren en general, la producción de alimentos y la rentabilidad de los cultivos (Singh y Husen, 2020).

El número de flores en el momento de inicio de la floración resultó mayor en el tratamiento de NPs de quitosano con menor concentración

(Fig. 6), lo cual está relacionado con la mayor altura verificada en ese tratamiento, lo cual se traduce en un mayor desarrollo de esas plantas. No obstante, es importante considerar que la evaluación se realizó al inicio de dicha fase, por lo que los resultados obtenidos no permiten inferir el número de frutos, aunque sí reflejan el efecto general sobre el crecimiento vegetal, como se ha

mencionado previamente.

La longitud del fruto se incrementó con las concentraciones de NPs de quitosano empleadas, y las más altas no mostraron diferencias significativas entre ellas, pero sí con respecto a la más baja y al control, donde se encontraron los frutos con menor tamaño (Fig. 7).

En el caso del diámetro de los frutos, éstos

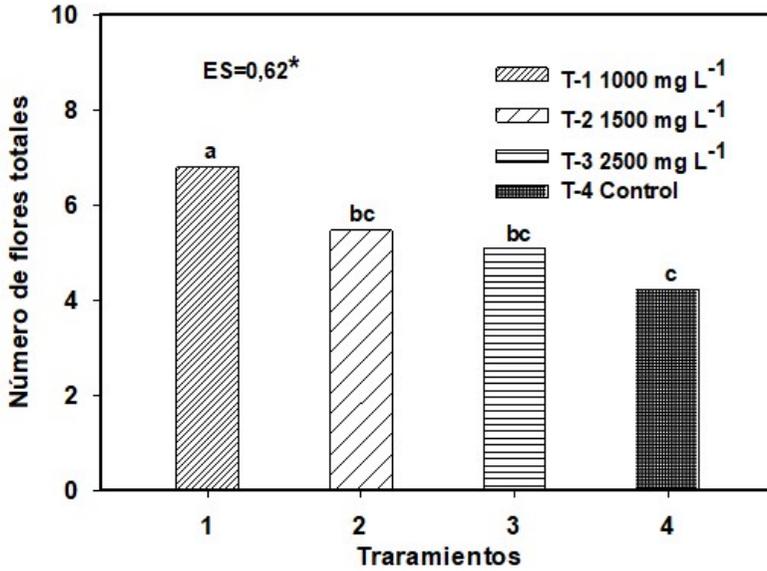


Fig. 6. Número de flores al inicio de la fase de floración. Letras diferentes encima de las barras, significa diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 6. Number of flowers at the beginning of the flowering stage. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

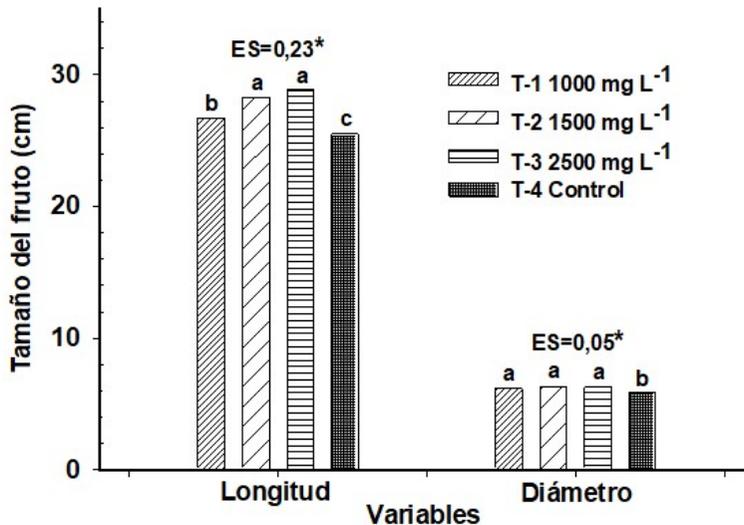


Fig. 7. Tamaño del fruto. Letras diferentes encima de las barras, significa diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 7. Fruit size. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

sólo se diferenciaron estadísticamente con el tratamiento control, observándose un promedio de alrededor de 5 cm. El largo de los pepinos es una vía de clasificación de los mismos y se colectan con valores por encima de 25 y 39 cm, en el caso de los alargados; pero en este comportamiento, las condiciones de cultivo juegan también un papel fundamental que influye en el tamaño de los frutos, el diámetro los valores oscilan entre 4 y 5 cm, semejante a los de los frutos del presente trabajo (Cruz et al., 2020).

El tamaño del fruto mostró una relación directa con el rendimiento total, lo que explica los mayores valores obtenidos en las plantas tratadas con nanopartículas de quitosano (Fig. 8). En diferentes estudios indican que relaciones lineales significativas entre estas variables, con coeficientes de regresión elevados que confirman relación entre estos parámetros (Cruz et al., 2021; Hin et al., 2023). El rendimiento se comportó de manera similar en las concentraciones más bajas de NPs de quitosano, pero con diferencias significativas respecto al tratamiento control, donde se encontraron los valores más bajos.

El quitosano ha incrementado su uso en la agricultura, debido a su impacto en la productividad, crecimiento, y calidad de diversos frutos (Basit et al., 2020). Igualmente estimula el crecimiento y desarrollo de esta especie (Reyes et al., 2024), así como la conservación y mejora postcosecha (Rendina et al., 2019).

En cuanto a los compuestos bioactivos, la

aplicación de 2.500 mg L<sup>-1</sup> de NPs de quitosano mostró la mayor acumulación de compuestos fenólicos totales, flavonoides, capacidad antioxidante y sólidos solubles, resultando estadísticamente diferente al tratamiento control. Los contenidos de polifenoles y flavonoides (Figs. 9A y 9B, respectivamente), se comportaron con niveles similares a los encontrados por Díaz et al. (2018), a diferencia de la cantidad de antioxidantes (Fig. 9C) que fue menor, aunque los valores más altos indicados por esos autores, se asociaron a una mayor presencia de Potasio en el sustrato por ellos empleados. Por otra parte, la mayor cantidad de estos compuestos, se ha encontrado en la epidermis del fruto (Vojnovic et al., 2024) al igual que ocurre en otros frutos (Rocha et al., 2023).

Un incremento de la cantidad de antioxidantes en función del aumento de la concentración de NPs de quitosano aplicada, así como del resto de los compuestos evaluados, mejora la calidad del fruto, como ha sido comprobado por otros autores en otros cultivos, lo que, a su vez, es el resultado de incrementos en la cantidad de flavonoides y polifenoles (Muhamad, et al., 2022).

El incremento de los contenidos de flavonoides tiene su explicación en el hecho de que la transcripción de los genes envueltos en la biosíntesis de flavonoides se ve favorecida por la presencia de quitosano en la planta, de acuerdo con lo informado por Jiao et al. (2018). Por su parte, Picos-Corrales et al. (2023) señaló

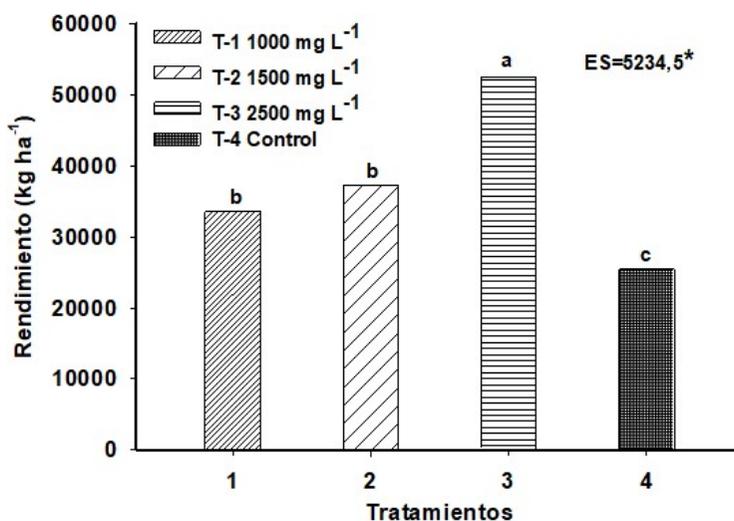


Fig. 8. Rendimiento. Letras diferentes encima de las barras, significa diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 8. Yield. Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

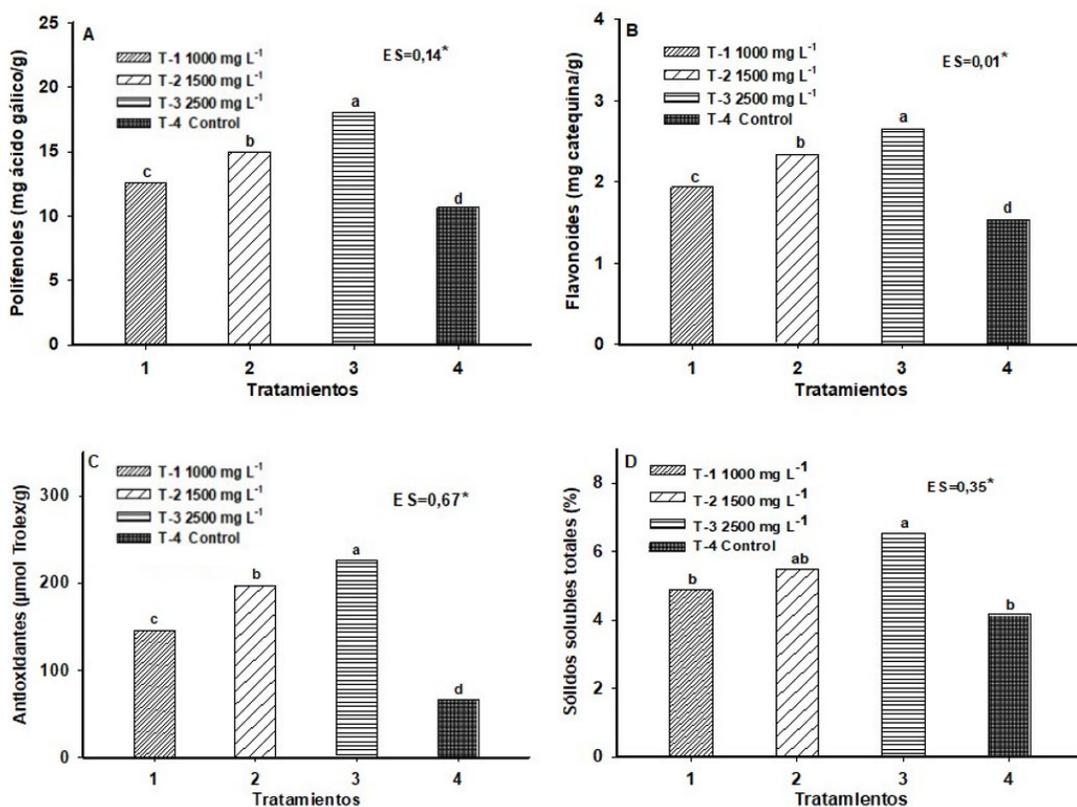


Fig. 9. Calidad nutraceutica de los frutos: polifenoles (A), flavonoides (B), antioxidantes (C) y sólidos solubles totales (D). Letras diferentes encima de las barras, significa diferencias significativas entre tratamientos a  $p \leq 0,05$ .

Fig. 9. Nutraceutical quality of fruits: polyphenols (A), flavonoids (B), antioxidants (C), and total soluble solids (D). Different letters above the bars indicate significant differences between treatments at  $p \leq 0.05$ .

que los tratamientos con quitosano, actúan como un elicitador del metabolismo secundario en general de las plantas; a la vez que los incrementos en el contenido de fenoles, en gran medida, se deben al hecho de que la síntesis de este compuesto se incrementa por el efecto de la aplicación de quitosano (Sangwam et al., 2023).

Los sólidos solubles totales (Fig. 9D) fueron más altos en presencia de NPs de quitosano, por encima de 5 %, a diferencia del control en que sólo se alcanzó un 4 %, no obstante, los valores en general están en el rango indicado por otros autores, aunque en esos casos se han aplicado otros tratamientos; sin embargo, cuando se emplearon en un trabajo distintos fertilizantes orgánicos (López et al., 2022), los valores fueron inferiores a los encontrados en este trabajo, aunque los del tratamiento control, resultaron similares en ambos trabajos (4 %).

En general, varios autores consideran de gran importancia a esta especie, por tener un

elevado contenido de compuestos químicos con varios usos en la farmacología (Teti et al., 2021) entre otros. Un incremento en el uso de NPs de quitosano ha experimentado la agricultura en los últimos años (García et al., 2023), pero no en todas las especies; en pepino, por ejemplo, son limitadas las publicaciones científicas en que se hayan empleado bioproductos a base de quitosano, sin embargo, otros nanomateriales han sido utilizados, sobre todo para corregir deficiencias nutricionales y control de enfermedades (Quirino et al., 2024).

### CONCLUSIONES

Las concentraciones bajas de nanopartículas de quitosano (1.000 y 1.500 mg L<sup>-1</sup>) favorecieron principalmente el crecimiento vegetativo de las plantas, mientras que la concentración más alta (2.500 mg L<sup>-1</sup>) se asoció con un mayor rendimiento y una mejora en la calidad nutraceutica de los frutos.

Estos hallazgos destacan el potencial del quitosano como herramienta bioestimulante en la producción agrícola sostenible. Sin embargo, es necesario continuar investigando para definir con mayor precisión las concentraciones óptimas y los momentos fenológicos más adecuados para su aplicación, con el fin de maximizar sus beneficios agronómicos y funcionales.

### Contribución de autores

Los siguientes autores tuvieron una participación activa en la revisión bibliográfica: Juan J. Reyes Pérez, Bernardo Espinosa-Palomeque; en la elaboración de la metodología: Juan J. Reyes Pérez, Luis T. Llerena Ramos; en la discusión de los resultados: Juan J. Reyes Pérez, Bernardo Espinosa-Palomeque; en la revisión y aprobación de la versión final del artículo: todos los autores.

### LITERATURA CITADA

- Aguirre L., D. Salguero, A. Bonilla y R. Salazar. 2024. Evaluación del desempeño del cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) frente a tres fertilizantes foliares en la parroquia Nuevo Paraíso, Orellana, Ecuador. *Revista Bionatura* 9(1):11. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2024.09.01.11>
- Akhi, K., and S. Islam. 2020. Comparative profitability analysis and policy options for sustaining integrated pest management practices on cucumber (*Cucumis sativus* L.) production. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 15(1):23-30. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2020.23.30>
- Allard, S. M., A.R. Ottesen, and S.A. Micallef. 2020. Rain induces temporary shifts in epiphytic bacterial communities of cucumber and tomato fruit. *Scientific Reports* 10(1):1765. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58671-7>
- Balusamy, S. R., S. Rahimi, J. Sukweenadhi, S. Sunderraj, R. Shanmugam, L. Thangavelu, I. Mijakovic and H. Perumalsamy 2022. Chitosan, chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plants. *Carbohydrate Polymers* 284:119189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119189>
- Basit, A., H. Khan, M. Alam, I. Ullah, S. Shah, S. Zuhair and I. Ullah. 2020. Quality indices of tomato plant as affected by water stress conditions and chitosan application. *Pure and Applied Biology* 9(2), 1364-1375. <https://dx.doi.org/10.19045/bspab.2020.90143>
- Chakraborty, M., M. Hasanuzzaman, M. Rahman, M.A.R. Khan, P. Bhowmik, N.U. Mahmud, Tanveer and Islam T. 2020. Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer. *Agriculture* 10(12):624. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120624>
- Chouhan, D., and P. Mandla. 2021. Applications of chitosan and chitosan based metallic nanoparticles in agrosociences-A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 166:1554-1569. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.035>
- Cruz, J. A., P. J. E. Monge and C. M. Loría. 2020. Comparación agronómica entre tipos de pepino (*Cucumis sativus*). *UNED Research Journal* 12(1): e2842. <https://doi.org/10.22458/urj.v12i1.2842>
- Cruz, J. A., J. E. Monge y M. Loría. 2021. Pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado en ambiente protegido: correlaciones entre variables. *Tecnología en Marcha* 34(4):75-91 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5334>
- Díaz, H. A., P. Preciado, E. Sánchez, J. R. Esparza, M. Fortis y V. P. Álvarez. 2018. El potasio en la calidad nutracéutica de frutos de pepino hidropónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Esp.* (20):4245-4250 <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.994>
- FAOSTAT. Crops and livestock products Roma-Italia: FAO, 2024. [Consulta: 06 marzo 2025]. <https://doi.org/10.4060/cd2971en>
- Félix, J. T., R. M. Peralta, A. Sandoval, A. Benavides y M. Cabrera. 2024. Tensión hídrica en la producción de pepino injertado y cultivado en suelo y sustrato. *Terra Latinoamericana* 42:e1784. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i.1784>
- García, M., O. Valdez, L. A. Cabanillas, M. J. Bernal, M. M. Rivera, E. P. Gutiérrez and B. Heredia. 2023. Potential agricultural uses of micro/nano encapsulated chitosan: A Review. *Macromol.* 3:614-635. <https://doi.org/10.3390/macromol3030034>
- Gokul, A., J. Mabaso, N. Henema, L. Otomo, O.O. Bakare, A. Klein, A. Innalegwu, A. Omolola, L.A. Niekerk, M. Nkomo and M. Keyster. 2023. Sustainable agriculture through the enhancement of microbial biocontrol agents: current challenges and new perspectives. *Applied Sciences* 13(11):6507. <https://doi.org/10.3390/app13116507>

- Ha, N. M. C., T. H. Nguyen, S.L. Wang, and A.D. Nguyen. 2019. Preparation of NPK nanofertilizer based on chitosan nanoparticles and its effect on biophysical characteristics and growth of coffee in green house. *Research on Chemical Intermediates* 45(1):51-63. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3630-7>
- Henriquez, C., C. Aliaga and E. Lissi, 2002. Formation and decay of the ABTS derived radical cation: A comparison of different preparation procedures. *International Journal of Chemical Kinetics* 34(12):659-665.
- Hidangmayum, A., and P. Dwivedi. 2022. Chitosan based nanoformulation for sustainable agriculture with special reference to abiotic stress: a review. *Journal of Polymers and the Environment* 30(4):1264-1283. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02296-y>
- Hin, L., C. Seng, V. Po and C. Suos. 2023. Modeling in estimation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit weight based on fruit length and diameter in response to harvest option. *Trends in Horticulture* 6(2):1-8. <http://dx.doi.org/10.24294/th.v6i2.2809>
- Ingle, P. U., S. S. Shende, P.R. Shingote, S.S. Mishra, V. Sarda, D.L. Wasule, V.D. Rajput, T. Minkina, M. Raj, S. Sushkova, S. Mandzhieva and A. Gade. 2022. Chitosan nanoparticles (ChNPs): A versatile growth promoter in modern agricultural production. *Heliyon* 8(11):e11893. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11893>
- Jabran, M., M. Amjad, S. Muzammil, A. Zahoor, F. Ali, S. Hussain, G. Muhae, M. Ijaz and L. Gao. 2024. Exploring the potential of nanomaterials (NMs) as diagnostic tools and disease resistance for crop pathogens. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 11:75. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00592-y>
- Jiao, J., Gai Q.-Y., Wang X., Qin Q.-P., Wang Z.-Y., Liu J., Fu Y.-J. Obtención de quitosano en cultivos de raíces peludas de *Isatis tinctoria* L. para mejorar la productividad de flavonoides, la expresión génica y la actividad antioxidante relacionada. *Ind. Crop. Prod.* 2018;124:28–35. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.056>
- Kubavat, D., K. Trivedi, V. Pradipkumar, K. Prasad, V.A. Gopalprishnan, H. Trivedi, R. Patidar, J. Chaudhari, B. Andhariya and A. Ghosh. 2020. Characterization of a chitosan-based sustained release nanofertilizer formulation used as a soil conditioner while simultaneously improving biomass production of *Zea mays* L. *Land Degradation and Development* 31(17):2734-2746. <https://doi.org/10.1002/ldr.3629>
- Li, J., J. Cao, C. Wang, N. Hao, X. Zhang, M. Liu, and T. Wu. 2022. Research progress on the leaf morphology, fruit development and plant architecture of the cucumber. *Plants* 11(16): 2128. <https://doi.org/10.3390/plants11162128>
- López, M. M., L. L. Escobedo, L. Alfaro y A. E. Morales. 2022. Impacto de abonos orgánicos asociados con micorrizas sobre rendimiento y calidad nutracéutica del pepino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13(5):785-798 <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.2868>
- Mohamed, N. G. and M.A. Abdel. 2023. Chitosan nanoparticles enhance drought tolerance in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L) via gene expression modulation. *Plant Gene* 34:100406. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2023.100406>
- Muhamad, I., A. Azkia, N. Sabila, V. Silviani, A. Haniffadli, D. Rizaldy and I. Fidrianny. 2022. Phytochemical and antioxidant profile: cucumber pulp and leaves extracts. *Macedonian Journal of Medical Sciences* 10(A):616-622 <https://doi.org/10.3889/oamjms.2022.8337>
- Okwuokenye, G. F. 2020. Farmers perception of farming cucumber in greenhouse for increased productivity in noun farms, kaduna, nigeria: an extension approach. *International Journal of Agriculture and Rural Development* 23(2):5265-5273
- Picos-Corrales, L. A., A. M. Morales-Burgos, J. P. Ruelas-Leyva, G. Crini, E. García-Armenta, S. A. Jiménez-Lam, L. A. Ayón-Reyna, F. Rocha-Alonzo, L. Calderón-Zamora, U. Osuna-Martínez, A. Calderón-Castro, G. De-Paz-Arroyo and L. N. Inzunza-Camacho. 2023. Chitosan as an outstanding polysaccharide improving health-commodities of humans and environmental protection. *Polymers* 15:526. <https://doi.org/10.3390/polym15030526>
- Prajapati, D., A. Pal, C. Dimkpa, U. Singh, K. A. Dev, J.L. Choudhary and V. Saharan. 2022. Chitosan nanomaterials: A prelude of next-generation fertilizers; existing and future prospects. *Carbohydrate Polymers* 288:119356. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119356>
- Quirino, A., C. Martínez, J. E. Sabino, M. Espinosa, M. Vázquez, M.Á. Maldonado. 2024. Aspersión foliar de nanoestructuras con zinc en plántulas de pepino (*Cucumis sativus*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* IV:e4095. <https://doi.org/10.19136/era.a11niv.4095>

- Ramírez, R. S. C., H. O. Ortega, M. H. Fortis, J. M. S. Nava, J. A. V. Orozco, y P. R. Preciado 2021. Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(4): 579-589. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2929>
- Rebollar, R. S., A. O. Ramírez, y M. J. Hernández. 2022. Competitividad y valor agregado de pepino Persa (*Cucumis sativus* L.) en agricultura por contrato: estudio de caso. *Terra Latinoamericana* 40:e952. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.952>
- Rendina, N., M. Nuzzaci, A. Scopa, A. Cuypers, and A. Sofo. 2019. Chitosan-elicited defense responses in Cucumber mosaic virus (CMV)-infected tomato plants. *Journal of Plant Physiology* 234-235, 9-17. <http://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.01.003>
- Reyes, P. J. J., L. T. Llerena, E. F. Quinatoa, B. L. Llerena, A. Palacios, E. Aragón y R. de Luna. 2024. Crecimiento y desarrollo de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) bioestimuladas con QuitoMax. *Terra Latinoamericana* (42): e1818. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.181>
- Rocha, C. C. A., G. G. Lucinda, L. J. Rodríguez, H. E. Araújo, C.V. Lima, and E. V. Vilas. 2023. Phenolic compounds profile and antioxidant activity of purple passion fruit's pulp, peel and seed at different maturation stages. *Scientia Horticulturae* 321(6):112244. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112244>
- Sangwan, S., P. Sharma, L. Wati and S. Mehta. 2023. Effect of chitosan nanoparticles on growth and physiology of crop plants. *Engineered nanomaterials for sustainable agricultural production, soil improvement and stress management* Chapter 4, 99-123. Eds: Azamal Husen. Wolaita Sodo University, Wolaita, Ethiopia. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00054-7>
- Sharif, R., M. Mujtaba, M. Ur Rahman, A. Shalmani, H. Ahmad, T. Anwar, D. Tianchan and X. Wang. 2018. The multifunctional role of chitosan in horticultural crops; a review. *Molecules* 23(4): 872. <https://doi.org/10.3390/molecules23040872>
- Sharma, V., L. Sharma, and K.S. Sandhu. 2020. Cucumber (*Cucumis sativus* L.). Nayik G.A. and A. Gull (eds.). *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Singapore, Springer. p. 333-340. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7470-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7470-2_17)
- Singh, R. K., M. E. Ruiz, V. D. Rajput, T. Minkina, R. L. Gómez, K. K. Verma, M. S. Shekhawat, C. Pinto, V. Falco and F. R. Quiroz. 2022. Viewpoint of chitosan application in grapevine for abiotic stress/disease management towards more resilient viticulture practices. *Agriculture* 12(9):1369. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091369>
- Singh, S. and A. Husen. 2020. Chapter 9 - Behavior of agricultural crops in relation to nanomaterials under adverse environmental conditions. In: A. Husen and M. Jawwaid (eds.) *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*. Elsevier 2020:219-256. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817852-2.00009-3>
- Singleton, V. L., R. Orthofer and R. M. Lamuela. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-ciocalteu reagent. *Methods Enzymol.* 299:152-178.
- Sun, W., M. H. Shahrajabian, S. A. Petropoulos and N. Shahrajabian. 2023. Developing Sustainable agriculture systems in medicinal and aromatic plant production by using chitosan and chitin-based biostimulants. *Plants* 12(13):2469. <https://doi.org/10.3390/plants12132469>
- Suwanchaikasem, P., A. Idnurm, J. Selby, R. Walker and B. A. Boughton. 2024. The impacts of chitosan on plant root systems and its potential to be used for controlling fungal diseases in agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation* 43:3424–3445 <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11356-1>
- Tambo, V. R., L. Romero, L. G. Merino, y S.E. Arévalo. 2023. Evaluación del rendimiento de pepino bajo dos sistemas de fertilización en invernadero. *RECIMUNDO* 7(2):19-32. [https://doi.org/10.26820/recimundo/7.\(2\)](https://doi.org/10.26820/recimundo/7.(2))
- Tarakanov, R., B. Shagdarova, T. Lyalina, Y. Zhuikova, A. Iina, F. Dzhalilov and V. Varlamov. 2023. Protective properties of copper-loaded chitosan nanoparticles against soybean pathogens *Pseudomonas savastanoi* pv. *glycinea* and *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens*. *Polymers* 15(5):1100. <https://doi.org/10.3390/polym15051100>
- Teti, A., B. Chandra and H. Rivai. 2021. Overview of traditional use, phytochemical and pharmacological activities of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine* 6(3):39-49. <http://dx.doi.org/10.47760/ijpsm.2021.v06i03.004>

- Torres, R. A., J. J. P. Reyes, T. Castellano, C. Angulo, A. E. E. Quiñones and M.L.G. Hernández. 2021. A biopolymer with antimicrobial properties and plant resistance inducer against phytopathogens: Chitosan. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49(1):12231 <https://doi.org/10.15835/nbha49112231>
- Vojnovic, Đ., I. Maksimovi, G. Koprivica, A.H. Tepi, A. Mili, B. Adamovi, Z. Šumić and Ž. Ilin. 2024. Optimizing greenhouse cucumber fertigation through grafting: Improving yield, bioactive compounds, and antioxidant activity. *Horticulturae* (10):1135. <https://doi.org/10.3390/horticulturae1011113>
- Yaramilla Complex. 2021. <https://unicontrol.com/wp-content/uploads/2021/06/YaraMila-COMPLEX-1.pdf>
- Yomira, A., C. Salguero, M.M. Semanate, and A.E. Salazar. 2025. Dosis de riego y eficiencia del uso de agua en la producción de *Cucumis sativus* en La Maná. *Revista de Investigación Agropecuaria Science and Biotechnology* 5(1):8-16. <https://doi.org/10.25127/riagrop.20251.1034%20>
- Zhishen, J., T. Mengcheng and W. Jianming. 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry* 64(4):555-559.

