

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**



**APLICACIÓN DE COMPLEJOS DE NANOQUITOSÁN-YODO PARA EVALUAR  
SU EFECTO BIOESTIMULANTE EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum  
lycopersicum*)**

Por:

**KARLA ELIZABETH HERNÁNDEZ RUIZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2025

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**

APLICACIÓN DE COMPLEJOS DE NANOQUITOSAN-YODO PARA EVALUAR SU EFECTO BIOESTIMULANTE EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*).

Por:

**KARLA ELIZABETH HERNÁNDEZ RUIZ**

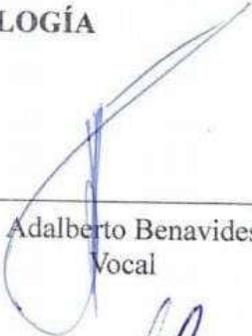
TESIS

Que somete a la consideración del H. jurado Examinador como requisito para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por:

  
M.C. Carlos Alberto García Agustince  
Presidente

  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Vocal

  
Dra. Luz Leticia Rivera Solís  
Vocal

  
Dra. Susana González Morales  
Vocal



  
M.C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2025

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**

APLICACIÓN DE COMPLEJOS DE NANOQUITOSAN-YODO PARA EVALUAR SU EFECTO BIOESTIMULANTE EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*).

Por:

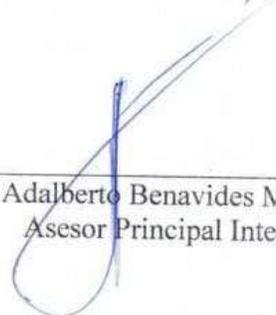
**KARLA ELIZABETH HERNÁNDEZ RUIZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por el comité de asesoría:



---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor Principal Interno



---

Dra. Luz Leticia Rivera Solís  
Asesor Principal Externo



---

Dra. Susana González Morales  
Coasesor



---

M.C. Carlos Alberto García Agustince  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2025

## Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio ó conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

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

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

Autor Principal

  
Karla Elizabeth Hernández Ruiz

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas y cada una de las personas que estuvieron presente en este proyecto de tesis, a quienes me brindaron su apoyo tanto directa como indirectamente:

- A la **Dra. Luz Leticia Rivera Solís** por haberme brindado su apoyo, tiempo y paciencia en la elaboración de este proyecto de tesis. Por estar dispuesta a resolver cada una de las dudas que se me presentaron en su momento.
- A la **Dra. Susana González Morales**, también por su apoyo, a quien tuve como asesora principal en este proyecto y pudo compartirme su conocimiento en clase. Por darme la oportunidad de ser parte de su proyecto.
- A **mis profesores** que me brindaron el conocimiento necesario en cada una de las materias de mi carrera profesional.
- A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi Alma Mater que fue como mi hogar durante estos años de carrera.
- A **Dios** principalmente, por darme la capacidad de hacer todo lo que he hecho hasta el momento.

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico principalmente a **Dios**, por darme la capacidad de llegar hasta aquí, por darme el entendimiento necesario, y sobre todo las fuerzas para nunca rendirme cuando más lo pensé.

A mis padres **Clara Elizabeth Ruiz, Jesús Hernández Balderas** y a mis hermanos **Jesús Edwin Hernández Ruiz y Guadalupe Monserrat Hernández Ruiz**, quienes son mi mayor inspiración.

A mi mejor amiga quien estuvo y ha estado presente desde los 12 años, siempre en las buenas y en las malas, **Kenia Raquel Gonzáles Santiago**.

A los amigos que la vida me dio, los cuales estuvieron y han estado apoyándome emocionalmente en mi camino.

Pero sobre todo a la persona que ha caminado con determinación a pesar del cansancio, que ha caído y aun así ha encontrado la fuerza para levantarse: **yo misma**. Me la dedico por no rendirme, por haber creído en mí incluso cuando las dudas y el miedo quisieron ganarme. Por cada esfuerzo silencioso, cada desvelo, cada lágrima y cada pequeño logro que me acercó hasta este momento.

Gracias a **Dios** y al universo por regalarme tantas experiencias, por darme la oportunidad de aprender, crecer y descubrir quién soy.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	V
DEDICATORIA .....	VI
ÍNDICE GENERAL .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos .....	3
HIPÓTESIS .....	3
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
Bioestimulantes.....	4
Qitosán y su potencial en la agricultura .....	5
Yodo .....	7
Yodo en la agricultura .....	7
Importancia biológica del Yodo.....	8
Yodo en la dieta.....	8
Disponibilidad de yodo en los alimentos .....	8
Mariscos y pescados.....	8
Algas marinas .....	8
Productos lácteos.....	9
Sal yodada.....	9
Deficiencia y exceso de yodo .....	9
Lactantes y embarazadas .....	9
Niñez y adolescencia .....	9
Exceso de yodo .....	9
Biofortificación.....	9
Generalidades del tomate .....	10
Fruto de tomate .....	10
La planta .....	11

Importancia en la salud humana .....	11
Propiedades antioxidantes .....	11
Beneficios para la piel y el sistema inmunológico.....	11
Salud cardiovascular y pérdida de peso .....	11
MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
Ubicación.....	12
Descripción del experimento .....	12
Descripción de los tratamientos.....	12
Muestreo y evaluación de variables .....	13
Análisis bioquímicos.....	13
Superóxido dismutasa (SOD) .....	13
Ascorbato peroxidasa (APX).....	14
Glutación peroxidasa (GPX) .....	14
Catalasa (CAT).....	14
Análisis de expresión génica .....	14
Análisis en frutos .....	15
Fenoles totales.....	15
Licopeno .....	16
Vitamina C .....	16
Capacidad antioxidante (DPPH).....	16
Análisis estadísticos .....	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
Proteínas totales .....	18
Actividad enzimática.....	19
Superóxido dismutasa (SOD) .....	19
Ascorbato peroxidasa (APX).....	20
Glutación peroxidasa (GPX) .....	22
Catalasa (CAT).....	24
Análisis de expresión génica .....	25
GEN <i>SOD</i> .....	25
Gen <i>APX</i> .....	26
Gen <i>GPX</i> .....	27
Gen <i>CAT</i> .....	28

Anlisis en frutos .....	29
Fenoles.....	29
Licopeno .....	31
Vitamina C .....	32
Capacidad antioxidante .....	33
CONCLUSIONES .....	34
BIBLIOGRAFÍA .....	35

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proteínas totales .....	19
Figura 2. Actividad enzimática de SOD.....	20
Figura 3. Actividad enzimática de APX.....	22
Figura 4. Actividad enzimática de GPX.....	23
Figura 5. Actividad enzimática de CAT .....	25
Figura 6. Expresión génica de <i>SOD</i> .....	26
Figura 7. Expresión génica de <i>APX</i> .....	27
Figura 8. Expresión génica de <i>GPX</i> .....	28
Figura 9. Expresión génica de <i>CAT</i> .....	29
Figura 10. Fenoles totales.....	30
Figura 11. Contenido de licopeno .....	31
Figura 12. Contenido de vitamina C .....	32
Figura 13. Capacidad antioxidante .....	33

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ingesta recomendada de yodo .....	8
Tabla 2. Descripción de tratamientos evaluados .....	12
Tabla 3. Secuencia de primers usados para los genes <i>ACT</i> , <i>SOD</i> , <i>APX</i> , <i>GPX</i> y <i>CAT</i> .....	15

## RESUMEN

Actualmente, los bioestimulantes juegan un papel importante en la agricultura ya que mejoran el rendimiento y la calidad de los cultivos, siendo amigables con el medio ambiente al mismo tiempo, por lo que el uso de estos representa una gran alternativa ecológica. En este trabajo se evaluó el efecto bioestimulante de complejos de nanoquitosán yodados (NPsCs-I) en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). En el experimento se aplicaron diez tratamientos distintos entre ellos yodato de potasio ( $KIO_3$ ) y yoduro de potasio (KI) en distintas concentraciones, así como combinaciones de estos complejos con nanoquitosán. Se evaluaron muestras de hojas del cultivo de tomate, donde hubo aplicaciones foliares durante 120 días y se colectaron muestras de hojas para evaluar el contenido de proteínas totales, la actividad enzimática de superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión peroxidasa (GPX) y catalasa (CAT), así como la expresión de dichos genes. Finalmente, en los frutos se analizó la calidad nutracéutica como fenoles totales, vitamina C y capacidad antioxidante. Los resultados mostraron que algunos tratamientos con NPsCs-I indujeron un aumento significativo en la síntesis de proteínas y en la actividad antioxidante, en especial en etapas tempranas del desarrollo del cultivo. Además, se observaron incrementos en la expresión génica de enzimas antioxidantes, particularmente en los genes *GPX* y *SOD*. En frutos, el tratamiento con NPsCs- $KIO_3$ -25 generó un incremento en el contenido de fenoles, sin afectar negativamente los demás parámetros evaluados. En conclusión, la aplicación de complejos NPsCs-I tiene un potencial bioestimulante en el cultivo de tomate, al activar mecanismos de defensa antioxidante y mejorar ciertos parámetros de calidad nutracéutica del fruto, sin generar efectos fitotóxicos.

**Palabras clave:** Actividad antioxidante, actividad enzimática, bioestimulante, complejos nanoquitosán yodados, expresión génica, fenoles totales, Vitamina C.

## ABSTRACT

Currently, biostimulants play an important role in agriculture as they improve crop yield and quality while being environmentally friendly, making their use a great ecological alternative. In this study, the biostimulant effect of iodinated nanochitosan complexes (NPsCs-I) was evaluated in tomato crops (*Solanum lycopersicum*). Ten different treatments were applied, including potassium iodate (KIO<sub>3</sub>) and potassium iodide (KI) at different concentrations, as well as combinations of these compounds with nanochitosan. Leaf samples from the tomato plants were evaluated following foliar applications over a period of 120 days. The samples were analyzed for total protein content and the enzymatic activity of superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), glutathione peroxidase (GPX), and catalase (CAT), along with the gene expression of these enzymes. Additionally, the nutraceutical quality of the fruits was analyzed, including total phenols, vitamin C, and antioxidant capacity. The results showed that some treatments with NPsCs-I significantly increased protein synthesis and antioxidant activity, particularly during early stages of crop development. Moreover, an increase in the gene expression of antioxidant enzymes was observed, especially in the *GPX* and *SOD* genes. In fruits, the treatment with NPsCs-KIO<sub>3</sub>-25 led to an increase in phenolic content without negatively affecting the other evaluated parameters. In conclusion, the application of NPsCs-I complexes has biostimulant potential in tomato crops by activating antioxidant defense mechanisms and improving certain parameters of the fruit's nutraceutical quality, without generating phytotoxic effects.

**Keywords:** Antioxidant activity, bioestimulant, enzymatic activity, gene expression, iodinated nanochitosan complexes, total phenols, Vitamin C.

## INTRODUCCIÓN

Los bioestimulantes son cualquier producto, sustancia o microorganismo, que desempeña un papel fundamental en las plantas, debido a que estimulan procesos vegetales, promueven el crecimiento vegetal, aumentan la tolerancia al estrés biótico y abiótico, además mejoran la calidad y la eficiencia de absorción de nutrientes cuando se aplican al cultivo (Valverde-Lucio *et al.*, 2020). Poseen numerosas ventajas, entre ellas ser amigables con el medio ambiente, la facilidad de su aplicación y la reducción de costos dado que se pueden utilizar en pequeñas cantidades para obtener efectos positivos en el cultivo (Sible *et al.*, 2021). Entre los tipos de bioestimulantes se encuentran los extractos vegetales, los ácidos húmicos y fúlvicos, los microorganismos y los compuestos inorgánicos como biomoléculas y biopolímeros (Cabrefiga y Boix, 2024). Dentro de los bioestimulantes destaca el quitosán, un biopolímero natural derivado de la quitina, que se encuentra principalmente en especies marinas. Este compuesto ha demostrado poseer propiedades benéficas en el desarrollo de cultivos, ya que mejora la adaptación de las plantas a condiciones adversas y mejora la absorción de nutrientes mejorando la calidad nutricional de sus frutos (Aranaz *et al.*, 2021). Sin embargo, a pesar de estas múltiples funciones es un polisacárido que tiene como desventaja tener una limitada solubilidad en agua a pH neutro o básico, por esto el quitosán tiende a disolverse en soluciones acidas, lo que limita su aplicación en los cultivos (Thangavelu *et al.*, 2021). Una alternativa que ha resultado ser eficiente para superar las limitaciones de solubilidad es la síntesis de nanopartículas de quitosán, las cuales por su tamaño reducido son de fácil absorción, mejorando la eficiencia fotosintética en las plantas, además tienen la capacidad de ligarse con otros elementos (García-García *et al.*, 2024).

El yodo (I) es un micronutriente benéfico para las plantas que aplicado en dosis adecuadas desempeña un papel importante en procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, como la síntesis de proteínas, la actividad enzimática y la división celular (Kiferle *et al.*, 2021). Por otro lado, para el humano es un elemento traza ya que cumple funciones importantes, una de ellas es la síntesis y regulación de las hormonas tiroideas triyodotironina (T3) y tiroxina (T4) (Hatch-McChesney y Lieberman, 2022). Es vital en el funcionamiento del sistema nervioso y algunos órganos importantes como el cerebro, el hígado, los riñones e incluso los músculos, además, su adecuada ingesta contribuye a la prevención de enfermedades como el bocio, hipotiroidismo, hipertiroidismo,

cretinismo, así como abortos espontáneos, retraso del desarrollo y crecimiento de los niños e incluso depresión y trastornos del estado de ánimo (Uricoechea *et al.*, 2019). La ingesta diaria recomendada de este micronutriente varía dependiendo de la edad del individuo, la OMS (2020) recomienda para menores de 1 a 13 años dosis de 90-120  $\mu\text{g día}^{-1}$ , para adultos la cantidad esencial es de 150  $\mu\text{g día}^{-1}$ , mientras que para mujeres embarazadas y lactantes se recomienda una cantidad de 220-290  $\mu\text{g día}^{-1}$  debido a que es de suma importancia para el desarrollo del feto y posteriormente para el recién nacido. Las principales fuentes son los mariscos, aunque en menor medida se puede encontrar este elemento en frutas y verduras (Kiferle *et al.*, 2013). Aunque la sal de mesa yodada es una estrategia que se ha implementado para agregar yodo a la dieta, el consumo en exceso genera problemas nocivos para la salud (Eveleigh *et al.*, 2020). El déficit de yodo en la población es un desafío global, actualmente una de las alternativas más eficientes son la fortificación y la biofortificación, que se logra mediante prácticas agrícolas o técnicas aplicadas directamente en etapas post cosecha para que las plantas produzcan alimentos ricos en nutrientes sin la necesidad de llevar a cabo una intervención adicional (Danso *et al.*, 2023). Además, este proceso es una estrategia amigable con el medio ambiente, ya que se adapta a condiciones climáticas adversas, evita riesgos de sobredosis de micronutrientes y reduce costos a largo plazo (Restrepo-Betancur *et al.*, 2020). En este sentido, la biofortificación tiene la ventaja de aplicarse en cultivos de consumo habitual, como lo es el tomate, que es ampliamente consumido en fresco, sin alterar su contenido nutricional (Muñoz V. y Marcelo, 2021). En México, esta hortaliza se produce y comercializa en numerosos estados de la república siendo Sinaloa, San Luis Potosí y Sonora los principales, generando un gran flujo en la economía nacional (FAO, 2023).

Por ello, el objetivo de esta investigación es evaluar la combinación de nanoquitosán con yodo en forma de complejo para conocer el efecto bioestimulante en el cultivo de tomate.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto bioestimulante de los complejos de nanopartículas de quitosán con yodo (NPsCs-I) en plantas de tomate.

### **Objetivos específicos**

- Determinar el efecto bioestimulante de los complejos de nanopartículas de quitosán con yodo (NPsCs-I) en plantas de tomate a través de la evaluación de la actividad enzimática.
- Determinar el efecto bioestimulante de los complejos de nanopartículas de quitosán con yodo (NPsCs-I) en plantas de tomate a través de la evaluación de la expresión génica.
- Evaluar el efecto de bioestimulante en los frutos de tomate tratados con nanopartículas de quitosán con yodo (NPsCs-I).

## **HIPÓTESIS**

La aplicación de los complejos nanoquitosán yodados (NPsCs-I) en el cultivo de tomate tendrá un efecto bioestimulante que impactará favorablemente en la calidad de sus frutos y en sus propiedades organolépticas.

## REVISIÓN DE LA LITERATURA

### **Bioestimulantes**

La agricultura moderna enfrenta una serie de desafíos, los cuales incluyen el bajo rendimiento de los cultivos, la degradación del suelo, y por ende la reducción de la biodiversidad (Velazquez-Chavez *et al.*, 2022). Estos problemas los vemos regularmente, como consecuencia del cambio climático, sequías, y el uso excesivo de fertilizantes químicos (Cabrefiga y Boix, 2021). Actualmente, los agricultores buscan soluciones eficientes a esta problemática, por ello los bioestimulantes han surgido como una herramienta prometedora, ya que ayudan a mejorar la salud de las plantas, aumentar la resistencia a enfermedades y optimizar la absorción de nutrientes de manera efectiva (David Murillo-Cuevas *et al.*, 2021). Los bioestimulantes son compuestos que, cuando son aplicados a las plantas o bien al suelo, mejoran su crecimiento, desarrollo y salud. A diferencia de los fertilizantes convencionales, los bioestimulantes no suministran directamente los nutrientes, si no que ayudan a optimizar los procesos fisiológicos de las plantas para que utilicen mejor los nutrientes disponibles del suelo (David Murillo-Cuevas *et al.*, 2022).

Los bioestimulantes se dividen en distintas categorías, a continuación se muestra su clasificación descrita por du Jardín (2015):

**Ácidos húmicos y fúlvicos:** Son compuestos derivados de la descomposición de materia orgánica (restos vegetales y animales), mejoran el suelo, aumentando su retención de agua y favoreciendo el intercambio de nutrientes, gracias a que estimulan la actividad microbiana (Lopez-Nataret *et al.*, 2022).

**Extractos vegetales y de algas:** Son obtenidos de plantas, como algas y hierbas, contienen compuestos bioactivos como polisacáridos, proteínas y fitohormonas los cuales pueden mejorar el crecimiento vegetal y aumentar la tolerancia al estrés (Valdés- Márquez *et al.*, 2023).

**Aminoácidos y proteínas:** Moléculas orgánicas, las cuales mejoran la asimilación de nutrientes, favorecen el crecimiento de las raíces y aumentan la resistencia al estrés fortaleciendo las paredes celulares y así mejorar el metabolismo de la planta (Romero-Félix *et al.*, 2023).

**Iones inorgánicos:** Los iones inorgánicos desempeñan un papel fundamental como bioestimulantes en la agricultura, ya que influyen en procesos fisiológicos

clave, mejoran la eficiencia nutricional y fortalecen la tolerancia de las plantas a diversos tipos de estrés. Algunos de los iones más relevantes son el Silicio, Hierro, Manganeseo, Zinc, Yodo, Cobre y Niquel (Guntzer, *et al.*, 2011).

**Microorganismos beneficios:** Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal, como bacterias (*Azospirillum*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*) y hongos (*Trichoderma*, micorrizas), mejoran la nutrición y el crecimiento de las plantas. Estos microorganismos pueden utilizarse solos, o en combinación con matrices orgánicas como bioestimulantes vegetales (Macias Benitez *et al.*, 2020; Roupheal, Y. *et al.*, 2021).

**Biopolímeros:** Son macromoléculas formadas por la unión de monómeros, ya que pueden ayudar a mejorar el crecimiento y desarrollo de la planta, entre estos el quitosán destaca por tener múltiples beneficios (Reyes-Pérez *et al.*, 2020).

### **Quitosán y su potencial en la agricultura**

El quitosán es un biopolímero que se obtiene a partir de la quitina por medio de algunas reacciones químicas que constan de una desmineralización, desproteinización y posteriormente una desacetilación (Aranaz *et al.*, 2021). La quitina es uno de los polisacáridos más conocidos y abundantes (después de la celulosa), en la naturaleza la encontramos en el exoesqueleto de algunos animales de mar como el camarón, crustáceos, cangrejos e incluso en escamas de pescado, aunque, también se puede encontrar en la pared celular de hongos y algas (Hemmani *et al.*, 2024). El quitosán está compuesto por dos unidades monoméricas  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 glucosídicos (Kocięcka y Liberacki, 2021). Es una molécula única debido a sus importantes características, y propiedades físicas, químicas y biológicas que necesita hasta un 60% de desacetilación con grupos funcionales hidroxilo (-OH) y amino (-NH<sub>2</sub>) (Saucedo-Plascencia *et al.*, 2023). Una característica, relevante es su propiedad antimicrobiana ya que posee la habilidad de que su carga positiva interactúe con la negativa de la membrana celular de los microorganismos, por ende, provocar la muerte de bacterias (Abd El-Hack *et al.*, 2020). Su función principal, así como la de la celulosa es la protección de los organismos que la contienen (Thambiliyagodage *et al.*, 2023). Por otro lado, Romero-Serrano y Pereira (2020), indican que el quitosán ha tenido numerosas aplicaciones en distintas industrias, tales como la farmacéutica, alimentaria, textil, papelería, incluso en la médica. Por otro lado, la aplicación del quitosán en la agricultura

ha sido utilizado en numerosas especies para distintas funciones, principalmente actúa como fertilizante, fungicida, antitranspirante y en general tiene un gran potencial con el control de enfermedades en las plantas (Harutyunyan y Lasareva, 2023).

Entre las especies que ha sido aplicado el quitosán, encontramos principalmente tomate, lechuga, fresas, uvas, frutillas como frambuesas, arándanos, y granos como el trigo, maíz, y alfalfa (Lima *et al.*, 2022). Tal como lo indican Pincay-Manzaba *et al.*, 2021, en su estudio en el cultivo de tomate aplicando quitosán observaron una mejora en los valores de altura de la planta, diámetro del tallo, número de racimos por, número de frutos por, diámetro ecuatorial y polar de los frutos, peso del fruto, así como el rendimiento. En este sentido Ramírez Rodríguez *et al.*, (2021) mencionan que el quitosán es una herramienta prometedora dentro del sector agrícola que es amigable con el medio ambiente, su costo es accesible y hasta el momento no se conocen registros de toxicidad tanto para los humanos como para otros organismos. Sin embargo, a pesar de sus múltiples beneficios tiene una limitación debido a su poca solubilidad en agua a pH neutro (Thangavelu *et al.*, 2021). Por ello una alternativa que resulta ser eficiente es la síntesis de nanopartículas que permiten incrementar la solubilidad en medios acuosos, además funcionan como portador para la unión de otros compuestos (Sharifi-Rad *et al.*, 2021).

### **Nanopartículas de quitosán**

La nanotecnología nos ofrece una herramienta en la agricultura actual, al producir elementos de interés como las nanopartículas, específicamente las nanopartículas de quitosán han cobrado un importante interés. Las nanopartículas de quitosán (NPs-Cs) son estructuras extremadamente pequeñas que van de 1-800 nm, fueron estudiadas por primera vez en la década de 1990, sin embargo, su aplicación en estudios biomédicos y agrícolas se dio apenas en los últimos 20 años, dado a esto han fungido un papel importante, gracias a que no son tóxicas y poseen propiedades biodegradables y biocompatibles, y la capacidad de ser absorbidas e incorporadas con facilidad a distintas moléculas y/o sustancias (González-Lemus *et al.*, 2024). Según estudios de Caro-León *et al.*, (2019), uno de los métodos más utilizados que existen para sintetizar estas nanopartículas es la gelificación iónica, la cual implica la interacción del quitosán con agentes entrecruzantes como el tripolifosfato de sodio (STPP), entre otros. Es importante mencionar que han sido aplicadas en numerosas especies tanto vegetales como animales,

obteniendo resultados significativamente positivos, ya que actúan como portadores de otros elementos que incrementan su eficiencia al tener una liberación controlada del mismo (Mostafa Saeedi *et al.*, 2022).

### **Yodo**

El yodo (I) es un elemento traza, no metal, con un número atómico 53, en la tabla periódica se encuentra en el grupo 17 y período 5, este pertenece al grupo de los halógenos (Bauer, 2020). Se dice que es uno de los 30 elementos esenciales para la vida, y las principales fuentes en las que puede ser encontrado es en forma de yodato ( $\text{IO}_3^-$ ) y yoduro ( $\text{I}^-$ ) (Espino-Vazquez *et al.*, 2022). En la naturaleza lo podemos encontrar principalmente distribuido en los océanos, y regiones cerca del mar, sin embargo, la cantidad de este elemento varía según el tipo de suelo y el clima, ya que este debido a su comportamiento va quedando atrapado en sedimentos (Fabrezi y Cruz, 2023). En cuanto a sus funciones, la principal de ella es la síntesis de las hormonas tiroideas, y durante el embarazo es esencial para el desarrollo neurológico del feto (Eslava-Schmalbach y Eslava-González, 2021).

### **Yodo en la agricultura**

Para las plantas, el yodo no se considera un elemento esencial por lo que no se incorpora en los planes de fertilización, sin embargo, una baja concentración es capaz de generar pérdidas de rendimiento similares a la deficiencia de otros micronutrientes (Hatch-McChesney y Lieberman, 2022). La cantidad disponible de este elemento varía según la especie y las condiciones del suelo, sin embargo, el promedio oscila entre 0.1 y 1  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Leija-Martínez *et al.*, 2016). Este micronutriente aporta numerosos efectos benéficos en la planta: mejora la floración, incrementa la germinación de semillas y mejora la eficiencia fotosintética (Medrano Macías *et al.*, 2023). Incluso, Kiferle *et al.*, (2021) aseguran que el yodo se une al menos a 82 proteínas, siendo parte estructural de estas, generando una respuesta endógena a diferentes condiciones de estrés. Sin embargo, en la mayoría de los suelos agrícolas se encuentran cantidades muy bajas de yodo, las cuales no tienen la disponibilidad para ser absorbidas por las plantas (Rodríguez-Salinas *et al.*, 2022). Algunos estudios demuestran que la aplicación de yodo aumenta la cantidad de fenoles totales y la capacidad antioxidante, esto depende de la concentración, el tipo de planta, la forma de yodo inorgánico y la forma de suministro (Halka *et al.*, 2020; Sabatino *et al.*, 2021).

## Importancia biológica del Yodo

### Yodo en la dieta

Al rededor del mundo, tenemos conocimiento sobre la importancia de ciertos nutrientes para nuestra dieta, sin embargo, la mayoría de las personas carece de información sobre el papel tan importante que juega el yodo en la alimentación humana. Según Abayomi (2021), es necesario tener conocimiento sobre una ingesta adecuada de este elemento. La cantidad diaria recomendada varía según la edad y el estado fisiológico (Tabla 1):

**Tabla 1.** Ingesta recomendada de yodo.

<b>Grupo de edad</b>	<b>Cantidad diaria recomendada (<math>\mu\text{g día}^{-1}</math>)</b>
Bebes hasta los 6 meses	110
Bebes de 7 a 12 meses	130
Niños de 1 a 8 años	90
Niños de 9 a 13 años	120
Adolescentes de 14 a 18 años	150
Adultos	150
Mujeres embarazadas y en periodo de lactancia	220-290

Información publicada por Institutos Nacionales de Salud NIH (2024).

## Disponibilidad de yodo en los alimentos

### Mariscos y pescados

Según información de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS, 2024), los mariscos como el bacalao y el atún son la principal fuente de yodo, así como los camarones, langostas y almejas.

### Algas marinas

La mayoría de las algas contienen una cantidad elevada de yodo, sin embargo, la variedad kelp, contiene concentraciones mucho más elevadas que pueden variar entre 16.8 y 165  $\mu\text{g g}^{-1}$  (Fleitas Ramírez, 2021).

### **Productos lácteos**

La leche y algunos de sus derivados como el yogurt y el queso contienen cantidades significativas de este elemento, de igual manera los huevos son una fuente rica aportando alrededor de 9.8  $\mu\text{g}$  por cada 100 gramos (Arbesú Fernández *et al.*, 2017).

### **Sal yodada**

La sal de mesa yodada también es una fuente importante de este mineral, sin embargo, es importante moderar su consumo ya que este se ve relacionado con distintas enfermedades cardiovasculares (OMS, 2020).

### **Deficiencia y exceso de yodo**

#### **Lactantes y embarazadas**

Eslava-Schmalbach y Eslava-González (2021), informan que una ingesta menor a lo recomendable provoca que las hormonas tiroideas no tengan un desarrollo adecuado, lo que podría traer como consecuencia distintas enfermedades, entre ellas, el bocio, hipotiroidismo e hipotiroidismo congénito. Además, en las embarazadas una ingesta insuficiente de yodo causa daños graves en el feto, como lo son el retraso mental y malformaciones estructurales.

#### **Niñez y adolescencia**

La deficiencia de yodo durante la niñez es más difícil de identificar, y esto podría causar problemas principalmente neurológicos, en su capacidad de razonamiento y desarrollo sexual tardío en la adolescencia (Aquino Yagual *et al.*, 2022).

#### **Exceso de yodo**

Como sabemos, todo en exceso es perjudicial, y el yodo no es la excepción, la ingesta elevada de este elemento causa los mismos problemas que causa una ingesta menor, principalmente el bocio, y la inflamación de la glándula tiroidea, en casos extremos el cáncer de tiroides. También se habla de los síntomas que podrían experimentarse en caso de consumir cantidades altas; fiebre, náuseas, diarrea, vómito, fuerte dolor de estómago, son algunos de ellos (Builes-Barrera, 2022).

### **Biofortificación**

A nivel mundial, la desnutrición y la malnutrición son un gran problema a los que se enfrenta la sociedad, ambos conceptos suelen confundirse, y es importante entender la diferencia que hay entre ellos, por una parte, la malnutrición se refiere a un desequilibrio

en la ingesta de nutrientes que son necesarios para que el organismo cumpla sus funciones vitales, mientras que la desnutrición hace referencia a la carencia de estos (Das *et al.*, 2020). Una alternativa que ha sido de gran ayuda para erradicar esta problemática es la biofortificación de los alimentos, principalmente en los cultivos, según Ofori *et al.*, (2022), la biofortificación es el aumento o la adición de nutrientes en los cultivos, cuando estos están en su etapa de crecimiento, esta práctica tiene numerosos beneficios, ya que no es costosa y es relativamente fácil de llevarse a cabo. Además, es sostenible con el medio ambiente, por lo tanto, es la opción más efectiva para aumentar el valor nutricional de los alimentos que consumimos, además puede implementarse mediante métodos agronómicos, como la aplicación foliar o el mejoramiento genético de las plantas (Sheoran *et al.*, 2022). Es por eso, que este proceso se lleva a cabo en especies de alto consumo para facilitar el suministro de nutrientes en deficiencia a la dieta, como el tomate que es un cultivo que permite la acumulación de yodo en sus frutos (Medrano Macías *et al.*, 2021).

### **Generalidades del tomate**

El tomate o jitomate (*Solanum lycopersicum*), es la hortaliza más consumida a nivel mundial, ocupando el décimo primer lugar de las especies más producidas (Rodríguez-Cabello *et al.*, 2020). Debido a su relevancia económica y cultural, el tomate se considera un elemento muy importante en la gastronomía mexicana, siendo considerado un símbolo de identidad culinaria (Gobierno de México, 2024). En México, la producción de esta hortaliza ha crecido considerablemente en los últimos años, ocupando nuestro país el décimo lugar de su producción a nivel mundial (Orona-Castillo *et al.*, 2022). México aporta aproximadamente el 25% del tomate que Estados Unidos consume, siendo los estados con mayor producción Sinaloa, Sonora y San Luis Potosí, gracias a sus buenas condiciones climáticas (Amador *et al.*, 2022). El tomate juega un papel crucial en la dieta mexicana, es consumido por las familias mexicanas de múltiples formas, tanto crudo como cocinado, es un alimento rico en Vitamina C, A y K, así como en compuestos como licopeno, potasio (K) y Zinc (Zn), por ende, es reconocido en la prevención de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer (Pérez de Pablos, 2024).

### **Fruto de tomate**

Tiene una forma generalmente redonda u ovalada, de diferentes colores, el más común rojo. En cuanto a su peso, este varía, va desde los miligramos hasta los 600 gramos, y el diámetro varía entre 3 y 16 cm, y existen algunas variedades del fruto que son muy

pequeñas y se conocen como tomate Cherry. Actualmente, las variedades de este fruto crecen continuamente, y gracias a las investigaciones estamos obteniendo plantas más resistentes y por ende frutos de mejor calidad (Guzmán Cruz *et al.*, 2021).

### **La planta**

En cuanto, a las características de la planta de tomate podemos ver que tiene un tallo muy poco rígido, por ende, no se puede mantener totalmente erguido. Tiene una raíz larga, la cual generalmente alcanza hasta los 60 cm de profundidad. Sus hojas son compuestas, están formadas de entre 7 y 11 hojas simples, por otro lado, la flor suele ser de color amarillo, las cuales florecen en fechas diferentes (Chiquito-Contreras *et al.*, 2018).

### **Importancia en la salud humana**

#### **Propiedades antioxidantes**

El tomate es rico en licopeno, un antioxidante que le da el color rojo al fruto característico, que está asociado con la reducción de algunos tipos de cáncer, entre otras enfermedades cardiovasculares (Navarro-González y Periago, 2016).

#### **Beneficios para la piel y el sistema inmunológico**

Así como es rico en licopeno, también cuenta con un alto contenido de vitamina C, la cual tiene beneficios en la piel, previniendo el envejecimiento prematuro, fortaleciendo el sistema inmunológico, y aumentando la resistencia hacia algunas infecciones (Vazquez Viton, 2023).

#### **Salud cardiovascular y pérdida de peso**

El consumo de tomate puede prevenir enfermedades cardiacas, esto gracias a la disminución de niveles de colesterol de baja densidad, por sus siglas en ingles LDL y la presión arterial (Pérez de Pablos, 2024).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación

Este trabajo fue realizado en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

### Descripción del experimento

El experimento se realizó en un invernadero cubierto con polietileno en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (Saltillo, México) de mayo a octubre de 2022. Se sembraron semillas de tomate híbrido CID F1 (Harris Moran Seed Company, Modesto, CA, EUA) tipo saladette).

### Descripción de los tratamientos

El experimento evaluó 10 tratamientos con cinco unidades experimentales compuestas por cuatro plantas por unidad. Los tratamientos utilizados se describen en la Tabla 2. La síntesis de complejos nanoquitosán-yodo se detalla en el protocolo establecido por Rivera-Solís *et al.*, 2024. Se realizaron ocho aplicaciones cada 15 días a partir del momento del trasplante, las cuales tuvieron una duración de 120 días.

**Tabla 2.** Descripción de tratamientos evaluados.

Tratamiento	Descripción
T0	Testigo absoluto
NPsCs	Testigo con nanoquitosán
KIO <sub>3</sub> -5	Yodato de potasio 5 mg L <sup>-1</sup>
KIO <sub>3</sub> -25	Yodato de potasio 25 mg L <sup>-1</sup>
NPsCs-KIO <sub>3</sub> -5	Complejo de NPsCs-I con 5 mg L <sup>-1</sup> de yodato
NPsCs-KIO <sub>3</sub> -25	Complejo de NPsCs-I con 5 mg L <sup>-1</sup> de yodato
KI-5	Yoduro de potasio 5 mg L <sup>-1</sup>
KI-25	Yoduro de potasio 25 mg L <sup>-1</sup>
NPsCs-KI-5	Complejo de NPsCs-I con 5 mg L <sup>-1</sup> de yoduro
NPsCs-KI-25	Complejo de NPsCs-I con 25 mg L <sup>-1</sup> de yoduro

### **Muestreo y evaluación de variables**

Se colectaron cuatro muestras de hojas 24 horas después de la aplicación de los tratamientos en momentos específicos: (1) después de la segunda aplicación de los tratamientos a los 16 días después del trasplante (DDT), (2) después de la cuarta aplicación de los tratamientos (46 DDT), (3) después de la sexta aplicación de los tratamientos (76 DDT) y (4) después de la octava aplicación de los tratamientos (106 DDT). Para cada muestreo se colectaron tres muestras de hojas compuestas por dos plantas seleccionadas aleatoriamente. Estas muestras se tomaron colectando la tercera hoja apical de la planta, congelándola inmediatamente con nitrógeno líquido y almacenándola en un ultracongelador a  $-80^{\circ}\text{C}$  para determinar metabolitos indicadores de estrés y la expresión de genes de defensa, y algunas de las muestras fueron liofilizadas para algunas determinaciones, como la actividad enzimática. De cada tratamiento se cosecharon todos los frutos de las plantas, cuando el fruto mostró un color rojo intenso. Además, se estableció un ensayo de vida útil con frutos cosechados del tercer racimo a temperatura fría ( $4^{\circ}\text{C}$ ) durante 20 días. En cuanto a las variables bioquímicas analizadas fueron fenoles, licopeno, vitamina C y la capacidad antioxidante.

### **Análisis bioquímicos**

En el análisis bioquímico se evaluaron los tejidos previamente congelados, los cuales fueron molidos manualmente usando un mortero y posteriormente liofilizados. Se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Model G10S, Wal-tham, MA, EUA) para el análisis de proteínas totales según el método de Bradford (1976). En el análisis de actividad enzimática se evaluaron 4 enzimas las cuales están relacionadas con el metabolismo antioxidante de la planta en respuesta a un estrés, las cuales fueron: superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión peroxidasa (GPX) y catalasa (CAT). Para todos los análisis enzimáticos, se consideraron cinco réplicas compuestas, con dos hojas por réplica por tratamiento.

### **Superóxido dismutasa (SOD)**

Siguiendo la metodología descrita por Medrano-Macías, (2022), utilizando un extracto de biomoléculas a partir de las muestras de hojas colectadas y el kit de ensayo comercial Cayman® 7060002 (Cayman Chemical Company, Ann Arbor, MI, EUA); los resultados se expresan en  $\text{U mL}^{-1}$ .

### **Ascorbato peroxidasa (APX)**

La actividad de APX en los extractos de biomoléculas se determinó de acuerdo con la técnica espectrofotométrica establecida por Nakano y Asada (1987), considerando dos tiempos de lectura (T0 y T1). Los valores de APX se expresaron como actividad enzimática (1  $\mu\text{mol}$  de sustrato (ácido ascórbico) convertido por minuto por contenido total de proteína).

### **Glutación peroxidasa (GPX)**

La actividad de GPX se midió como lo describen Flohé y Günzler (1984), y se expresó como mM glutación por minuto por contenido total de proteína.

### **Catalasa (CAT)**

La actividad de catalasa se cuantificó mediante espectrofotometría, y se registraron dos tiempos de reacción (T0 y T1), siguiendo la metodología descrita por Dhindsa *et al.*, (1981). Los resultados se expresan en mM  $\text{H}_2\text{O}_2$  por contenido de proteínas totales.

### **Análisis de expresión génica**

En el análisis de expresión génica se realizó la técnica de PCR en tiempo real, considerando tres réplicas compuestas por dos hojas cada una por tratamiento y evaluando un solo muestreo. El ARN se extrajo mediante TRI Reagent®, se purificó con cloroformo y se precipitó con isopropanol (Cui *et al.*, 2004). La cuantificación del ARN tratado con DNasa I (Sigma–Aldrich, Burlington, MA, EE. UU.) se realizó mediante un espectrofotómetro UV–Vis con una relación A260/A280 nm, y la calidad se determinó visualmente mediante electroforesis desnaturizante. La síntesis de ADNc se realizó mediante un kit comercial Bionline (SensiFAST cDNA Synthesis Kit). Se utilizó actina como endógena (ACT) y cuatro genes: *CAT*, *SOD*, *GPX* y *APX*. Los primers utilizados fueron diseñados a través del software Primer BLAST (National Center for Biotechnology Information (NCBI), Bethesda, Rockville, MD, EE. UU.) y Oligoanalyzer 3.1 (Integrated DNA Technologies IDT, Coralville, IA, EE. UU.). Las secuencias de los primers utilizados se describen en la Tabla 3.

La PCR en tiempo real se realizó en un Applied Biosystems StepOne™ versión 2.3 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EE. UU.) a través del método  $\Delta\Delta\text{Ct}$  midiendo la intensidad de fluorescencia de SYBR™ Select Master Mix (Applied Biosystems, Foster City, CA, EE. UU.). La PCR se realizó a un volumen de 20  $\mu\text{L}$  para todos los genes (10  $\mu\text{L}$  de Master Mix, 1  $\mu\text{L}$  de ADNc, concentración de primers y agua libre de

nucleasas). Para el gen *ACT*, la concentración de primers directos fue de 72 nM, y se utilizaron 60 nM para el primer inverso. Para los genes *APX* y *SOD*, las concentraciones de cebador fueron de 300 nM. Para los genes *GPX* y *CAT*, la concentración de cebador directo fue de 100 nM. La PCR en tiempo real se realizó en las siguientes condiciones: 10 min a 95 °C y 40 ciclos de 15 seg a 95 °C y 1 min a 60 °C. Además, se generó una curva de fusión

**Tabla 3.** Secuencia de primers usados para los genes *ACT*, *SOD*, *APX*, *GPX* y *CAT*.

GEN	Forward prime 5'-3'	Reverse prime 5'-3'	Tm
<i>ACT</i>	CCCAGGCACACAGGTGTAT	CAGGAGCAACTCGAAGCTCA	60°C
<i>SOD</i>	TGGGAATCTATGAAGCCCAAC	AATTGTGTGCTGCAGCTGC	60°C
<i>APX</i>	TGACCACTTGAGGGACGTGT	CAGAACGCTCCTGTGGCAT	60°C
<i>GPX</i>	ACGGAGCAAGCGACAATTGACAAC	CGATTGATTCACCGCAAAGCTCGT	60°C
<i>CAT</i>	CCATCCAATAATCATCAGAG	GGATAAAATAAAAATTATTTT	60°C

### **Análisis en frutos**

En el análisis de frutos, los frutos cosechados del tercer racimo se utilizaron para la evaluación de variables relacionadas con la calidad nutricional de los frutos tratados con nanopartículas de quitosán con yodo, las cuales fueron: fenoles totales, licopeno, vitamina C y capacidad antioxidante.

### **Fenoles totales**

El contenido de compuestos fenólicos totales se extrajo con una muestra de 200 mg de tejido liofilizado agregando 1 mL de la solución agua: acetona en una proporción 1:1 (Yu y Dahlgren, 2000). Se sometió a vórtex por 30 seg, posteriormente se sonificó por 5 minutos, finalmente se sometió a centrifugación a 4 °C y 12,500 rpm por 10 min. Se retiró el sobrenadante y la cuantificación se efectuó colorimétricamente mediante el reactivo Folin-Ciocalteu (Sigma Aldrich, Alemania). Se tomaron 50 µL del extracto y se agregaron 200 µL del reactivo Folin-Ciocalteu, se añadieron 500 µL Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 20% y se adicionaron 5 mL de agua destilada, una vez hecha la mezcla fue sometida a vórtex, se colocó a 45 °C durante 30 min para que la reacción fuera efectuada y se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 750 nm (Sultana *et al.*, 2009). La curva de calibración se trazó con ácido gálico a concentraciones de 100, 250, 500, 750 y 1000 mg L<sup>-1</sup>, siguiendo el mismo protocolo para las muestras.

## **Licopeno**

En la cuantificación de licopeno en fruto de tomate se pesaron 100 mg de tejido liofilizado y se colocaron en tubos de 2 mL, se agregaron 1.5 mL de hexano y se sometió a agitación en vórtex por 30 seg., después se sonificó por 5 min y se centrifugó a 4 °C por 10 min a 10,000 rpm. Se extrajo el sobrenadante y se filtró con membranas de nylon de 0.45 µm de diámetro de poro. Para leer la absorbancia de la muestra se hizo una dilución 1:10 (muestra/hexano), se cuantificó con un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Modelo G10S, Waltham, MA, EE. UU.) a una longitud de onda de 472 nm y la concentración fue obtenida mediante la curva de calibración previamente trazada con estándar de licopeno en un rango de concentraciones de 2 a 25 mg L<sup>-1</sup> (Bunghez *et al.*, 2011). Los resultados se expresaron en mg 100 g de peso seco.

## **Vitamina C**

Se pesaron 10 mg de peso fresco de fruto, se maceró en mortero con 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 2% (v/v), hasta que la cascara quedara totalmente transparente con la intención de que todo el contenido de vitamina C sea liberado. Posteriormente, se homogenizo, se llevó a cabo una filtración a través de una gasa estéril sobre un matraz de aforación. Se aforo a 100 mL con agua destilada y se tomó una alícuota de 10 mL de filtrado. Por último, se llevó a cabo una titulación con 2-6 diclorofenolindofenol hasta obtener una coloración rosácea persistente.

La cuantificación del contenido de vitamina C se realizó con la siguiente ecuación:

$$\text{Vit C} = \frac{(\text{ml utilizado de 2-6 diclorofenolindofenol} * 0.088 * \text{volumen total} * 100)}{(\text{volumen alícuota} * \text{peso de muestra})}$$

## **Capacidad antioxidante (DPPH)**

La capacidad antioxidante se determinó en frutos liofilizados siguiendo la metodología descrita por Kotíková *et al.*, (2011), con algunas modificaciones. Se usaron 100 mg de tejido macerado, se colocaron en tubos eppendorf de 2 mL y se agregó 1.5 mL de metanol puro. Se agitaron en vórtex por 20 seg, posteriormente se sonificó por 10 minutos y se centrifugó a 12,000 rpm a 4 °C por 15 minutos. El sobrenadante se extrajo con jeringas y se filtró con membrana de nylon de poro de 0.45 µm de diámetro. La reacción se llevó a cabo con DPPH a una concentración de 0.1 mM, utilizando 750 µL de la muestra y el

reactante, se dejó reposar por 15 minutos y se realizó la lectura de la absorbancia a una longitud de onda de 530 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Modelo G10S, Waltham, MA, EE. UU.). La curva de calibración se trazó utilizando como estándar trolox a una concentración de 0.1 mM usando como solvente metanol puro, midiendo las concentraciones de 0, 0.015, 0.045, 0.105, 0.210, 0.420 mM. Los resultados se expresaron en mM TEAC (Trolox equivalent Antioxidant Capacity, por sus siglas en inglés).

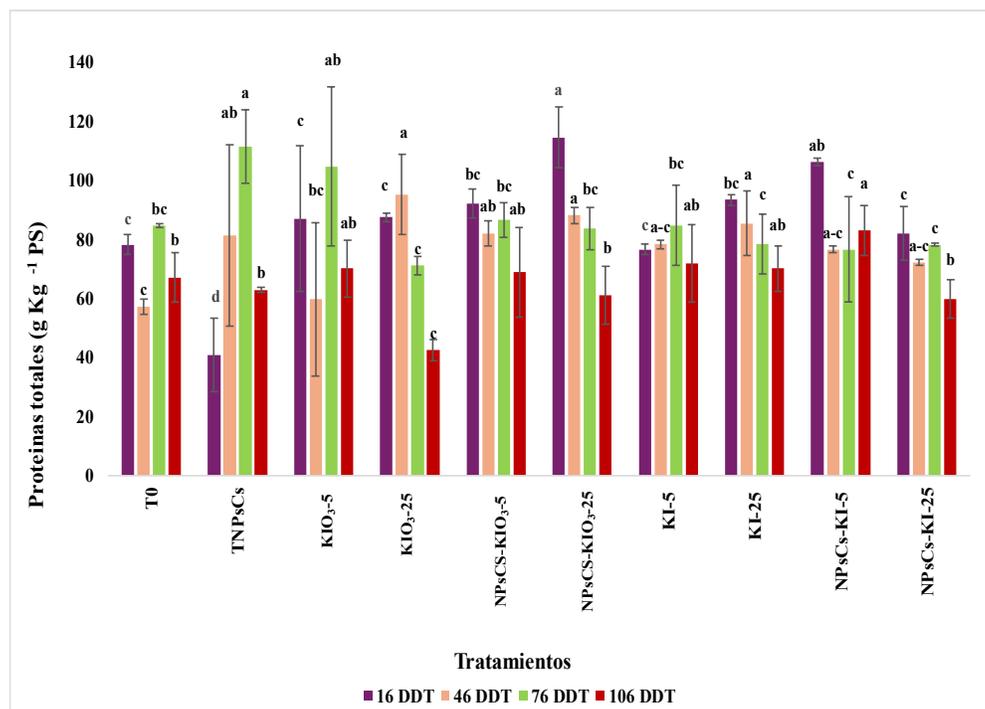
### **Análisis estadísticos**

En el análisis estadístico se siguió un diseño completamente al azar con cinco repeticiones para la actividad enzimática y tres repeticiones para la expresión génica y para el análisis de calidad de frutos. Los datos se analizaron en el programa Infostat (v2020) para determinar las diferencias entre el control absoluto y los tratamientos. Para determinar las diferencias entre medias se realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba LSD de Fisher a una probabilidad del 5% (valor  $p < 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Proteínas totales

En la Figura 1 se muestra el contenido de proteínas totales, donde podemos observar diferencias significativas a lo largo del tiempo. A los 16 DDT, la aplicación del tratamiento NPsCs-KIO<sub>3</sub>-25 incrementó un 46.37% respecto al testigo absoluto. Por otro lado, a los 46 DDT, el tratamiento KIO<sub>3</sub>-25 presentó un incremento del 66.45%, respecto al T0. En el tercer muestreo (76 DDT) la aplicación del TNPsCs presentó una diferencia del 31.90%, respecto al T0. Por último, a los 106 DDT el tratamiento NPsCs-KI-25 incrementó un 23.64%. Estos resultados sugieren que tanto el quitosán como el yodo pueden influir en la síntesis de proteínas en la planta. La aplicación de ambos elementos puede inducir la activación de genes relacionados con la producción de proteínas involucradas en el metabolismo antioxidante y la respuesta a estrés biótico y abiótico (Costales-Menéndez *et al.*, 2020; Reyes-Pérez *et al.*, 2020). El quitosán ha mostrado capacidad para regular la expresión de proteínas relacionadas con el crecimiento vegetal, favoreciendo la acumulación de proteínas específicas en los tejidos (García-Mendoza *et al.*, 2019). Por otro lado, aunque el yodo no es considerado un elemento esencial para las plantas, su aplicación puede influir en la expresión de proteínas relacionadas a la respuesta al estrés y la homeostasis celular (García Fuentes, 2021; Herrera Castellanos, 2022). Los diferentes muestreos indican que la respuesta en la síntesis de proteínas varía a través del tiempo. El incremento más alto se observó en el tratamiento KIO<sub>3</sub>-25 a los 46 DDT (66.45%) lo cual sugiere que la respuesta por el yodo es más notable en las primeras etapas de desarrollo de la planta. En general, estos resultados respaldan la idea de que tanto el quitosán como el yodo pueden inducir la síntesis de proteínas.



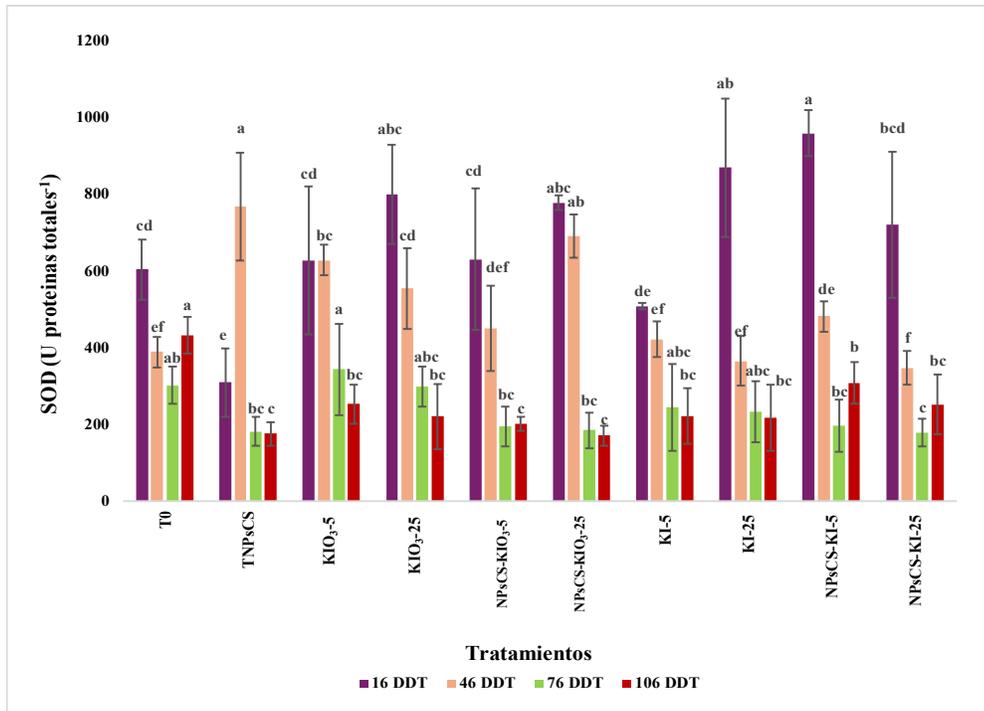
**Figura 1.** Contenido de proteínas totales. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=5$ ). DDT= días después del trasplante.

## Actividad enzimática

### Superóxido dismutasa (SOD)

En la Figura 2, se observa la actividad enzimática de SOD. Esta enzima mostró variaciones en cada uno de los tiempos, a los 16 DDT el tratamiento de NPsCS-KI-5 mostró la mayor actividad con un 58.81% respecto al testigo absoluto. Por otro lado, a los 46 DDT podemos observar que el mejor tratamiento fue TNPsCS, con un incremento de 97.78% respecto al T0. A los 76 DDT la mayor actividad de SOD se observó en KIO<sub>3</sub>-5, con un 13.58% mayor al testigo absoluto. Así como lo indican Blasco *et al.*, (2011), al agregar IO<sub>3</sub> en plántulas de tomate a una concentración de 40  $\mu\text{M}$  se tuvo un incremento en la actividad de SOD, esto nos puede decir que, el superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) que es un radical libre el cual daña moléculas celulares como proteínas, lípidos y ADN (Guija-Guerra y Guija-Poma, 2023) se pudo haber manifestado, por ende, la alta actividad de SOD, misma que se encarga de transformarlo a peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Además, hay reportes que indican que el IO<sub>3</sub> es capaz de reaccionar rápidamente contra los radicales libres (Medrano Macías *et al.*, 2016). En cambio, a los 106 DDT ningún tratamiento mostró un efecto significativo sobre la actividad de la enzima. Este fenómeno puede indicar que los tratamientos tienen un impacto diferente en ciertas etapas de crecimiento. El comportamiento observado indicó que la actividad de SOD no fue constante a lo largo

del tiempo, según los autores Rauf Abdur *et al.*, (2021), mencionan que existe la posibilidad de que cuando la planta madura la capacidad antioxidante se estabiliza, por lo tanto, los tratamientos ya no tienen impacto significativo

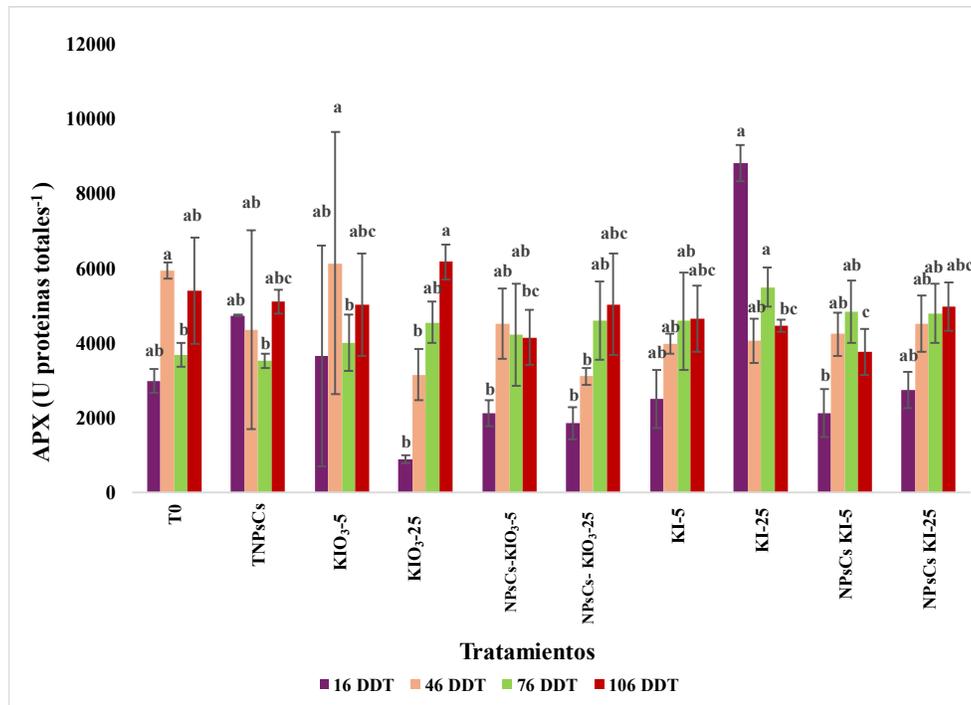


**Figura 2.** Actividad enzimática de SOD. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=5$ ). DDT= días después del trasplante.

### Ascorbato peroxidasa (APX)

La APX es una enzima clave en la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS), particularmente del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), utilizando ascorbato como sustrato (Zarate-Martínez *et al.*, 2021). En la Figura 4 se muestra la actividad de APX en los distintos tratamientos evaluados a lo largo del tiempo. A los 16 DDT, el tratamiento KI-25 mostró la mayor actividad enzimática, con un incremento de 1.95 veces respecto al testigo absoluto. A los 46 DDT, el mejor tratamiento fue  $KIO_3-5$ , con una actividad 3.54% mayor en comparación con el testigo. Posteriormente, a los 76 DDT, KI-25 nuevamente presentó la mayor actividad, con un 49.46% de incremento. Finalmente, a los 106 DDT,  $KIO_3-25$  mostró el mejor desempeño, con una actividad 14.37% mayor en comparación con el testigo. Algo relevante de este

estudio es que ninguno de los tratamientos con NPsCs mostró efectos significativos en la actividad de APX, ya que su efecto redujo considerablemente respecto al T0, mientras que la aplicación de yodo en sus distintas formas sí influyó significativamente en la enzima. Esto sugiere que el yodo podría desempeñar un papel en la regulación del sistema antioxidante de la planta (Blasco *et al.*, 2013; Leyva-González *et al.*, 2021), ya que se ha reportado que, conforme las plantas crecen, pueden generar altos niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS), incluyendo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, como parte de los procesos metabólicos asociados (Sharma *et al.*, 2012). Por otro lado, se ha dicho que el yodo puede inducir respuestas antioxidantes en las plantas mediante la activación de genes relacionados con la síntesis de compuestos antioxidantes (González-Morales *et al.*, 2017; Landi *et al.*, 2019). En este sentido, el incremento en la actividad de APX en los tratamientos con yodo sugiere que este elemento podría estar promoviendo una mayor capacidad antioxidante en el fruto, posiblemente mediante la inducción de rutas metabólicas involucradas en la homeostasis redox. Sin embargo, el hecho de que los tratamientos con NPsCs no hayan mostrado efectos significativos en la actividad de APX podría indicar que, en este caso, el quitosán no actuó como un bioestimulante eficiente para la regulación del sistema antioxidante en tomate (referencia). Algunos estudios han demostrado que el quitosán puede inducir respuestas antioxidantes en otras especies vegetales, pero su efectividad depende de factores como la concentración aplicada, la composición química de las nanopartículas y la fisiología específica de la planta (Zhang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022).



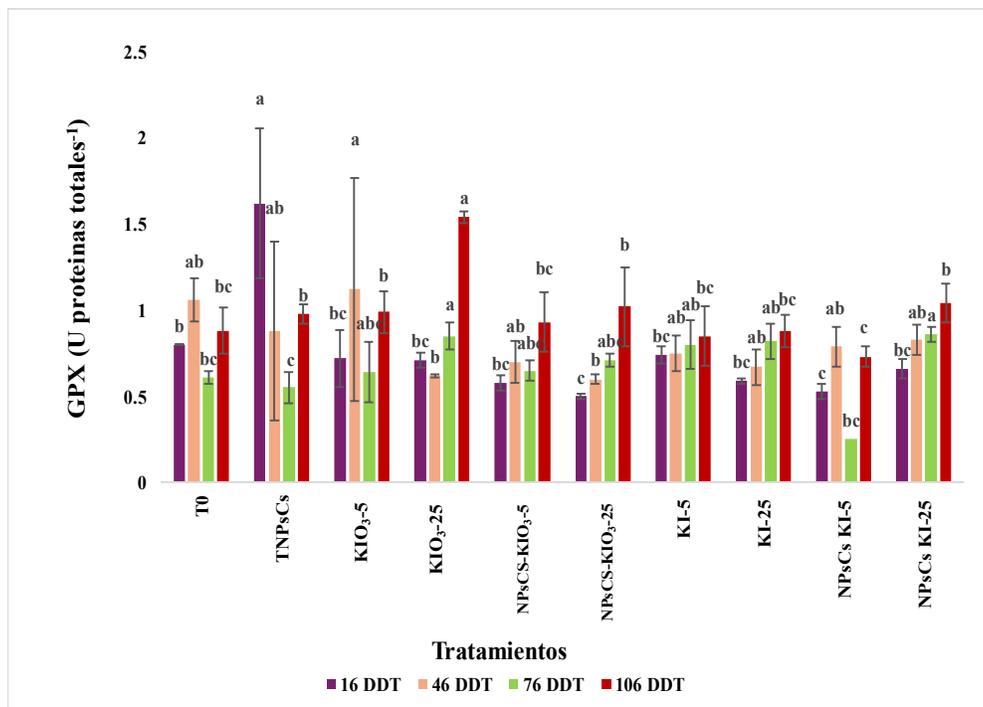
**Figura 3.** Actividad enzimática de APX. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=5$ ). DDT= días después del trasplante.

### Glutación peroxidasa (GPX)

La Figura 4, nos muestra los resultados de la actividad enzimática de GPX, la cual es una enzima crucial para la defensa antioxidante. Los resultados nos muestran que, a los 16 DDT el mejor tratamiento fue TNP8Cs, con una respuesta de 102% más que el testigo absoluto, este hallazgo puede compararse con estudios previos, descritos por Ramírez Rodríguez *et al.*, (2023) reportaron que la aplicación foliar de NP8Cs a una concentración de  $0.08 \text{ mg ml}^{-1}$  en tomate incremento la actividad de GPX, y como consecuencia una mejora en la capacidad antioxidante de la planta. También mencionan que la actividad de GPX pudo incrementar con las NP8Cs debido a la cantidad de N que estas contienen, que juega un papel muy importante en la síntesis de proteínas, lo cual podemos relacionarlo con nuestros resultados. Por otro lado, a los 46 DDT el mejor resultado lo mostró KIO<sub>3</sub>-5, el cual fue 5.6% veces mayores, en cambio a los 76 y 106 DDT el mejor tratamiento fue KIO<sub>3</sub>-25, mostrando un incremento del 39% y 75% respectivamente al testigo absoluto. En contraste, estudios de Medrano Macías *et al.*, (2016), evaluaron la aplicación de KIO<sub>3</sub> en tomate y no encontraron cambios significativos. Sin embargo, se cree que en

nuestros resultados la forma de yodo influye significativamente, ya que favoreció y aumentó

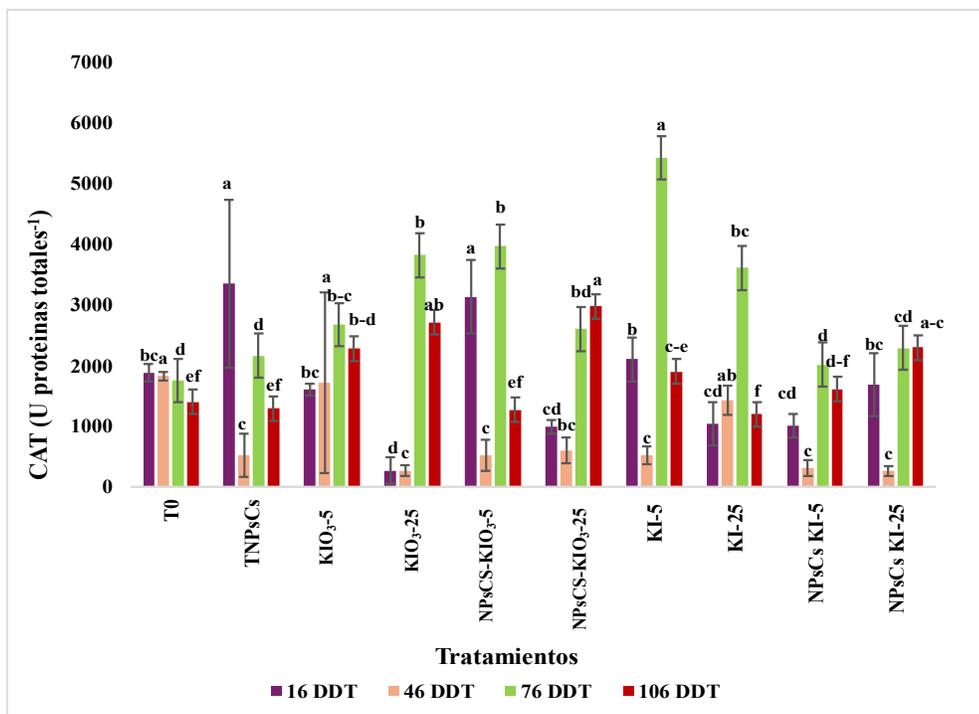
la actividad enzimática de GPX, lo cual podría significar que en las últimas etapas fenológicas del cultivo pudo existir un aumento de ROS, por ende, el aumento de su actividad (Ogidan Omotosho *et al.*, 2024). Mientras que, las respuestas de las nanopartículas son más fuertes en la primera etapa (López Vargas *et al.*, 2021). Con esto, podemos concluir que el KIO<sub>3</sub> es el mejor tratamiento ya que favoreció el metabolismo antioxidante significativamente sin causar algún efecto negativo al cultivo.



**Figura 4.** Actividad enzimática de GPX. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=5$ ). DDT= días después del trasplante.

### **Catalasa (CAT)**

La CAT juega un papel esencial en la eliminación del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) para proteger a las células vegetales del daño oxidativo. Su actividad es un indicador clave de la respuesta antioxidante de las plantas ante diferentes estímulos ambientales y tratamientos (Cecerska-Heryć *et al.*, 2021). En este estudio, se observó una gran variabilidad en la actividad de CAT a lo largo de los diferentes muestreos y tratamientos, lo que sugiere que la actividad de esta enzima depende de múltiples factores, por ejemplo, la composición del tratamiento aplicado, la etapa de la planta y el nivel de estrés oxidativo presente en cada etapa. A los 16 DDT, el mejor tratamiento fue TNPsCS, con una actividad de CAT un 58.09% mayor respecto al testigo absoluto. Este resultado es consistente con lo reportado por Treviño-Ruiz *et al.*, (2024) en un estudio en lechuga, donde la aplicación de NPsCs-I no mostró efectos negativos en las respuestas antioxidantes de la planta, lo que sugiere que la aplicación de NPsCs-I da una mejor regulación del estrés oxidativo al inducir una respuesta adaptativa. A los 46 DDT, el mejor resultado se obtuvo en el tratamiento  $KIO_3$ -5, con un incremento del 15.52% en comparación con el testigo absoluto. Estudios previos en plántulas de tomate tratadas con  $KIO_3$  y KI indicaron que estas formas de yodo no tuvieron cambios significativos de la actividad de CAT, pero sí influyeron en otras enzimas antioxidantes como la APX (Medrano-Macías *et al.*, 2016). En la etapa más avanzada del crecimiento, a los 76 DDT, el mejor tratamiento fue KI-5, cuya actividad de CAT fue 2.12 veces mayor en comparación con el testigo absoluto. Este resultado puede ser relevante, ya que el yodo, en sus diversas formas, ha sido reportado como un elemento que puede inducir respuestas de defensa en las plantas (González-Morales *et al.*, 2017). Finalmente, a los 106 DDT, el tratamiento NPsCs- $KIO_3$ -25 mostró un incremento del 23.80% en comparación con el testigo absoluto. Esto nos puede indicar que las NPsCs-I dan una respuesta de CAT más fuerte en las primeras y últimas etapas del crecimiento de la planta, posiblemente a través de la inducción de mecanismos de defensa contra el estrés oxidativo (López-Vargas *et al.*, 2018).

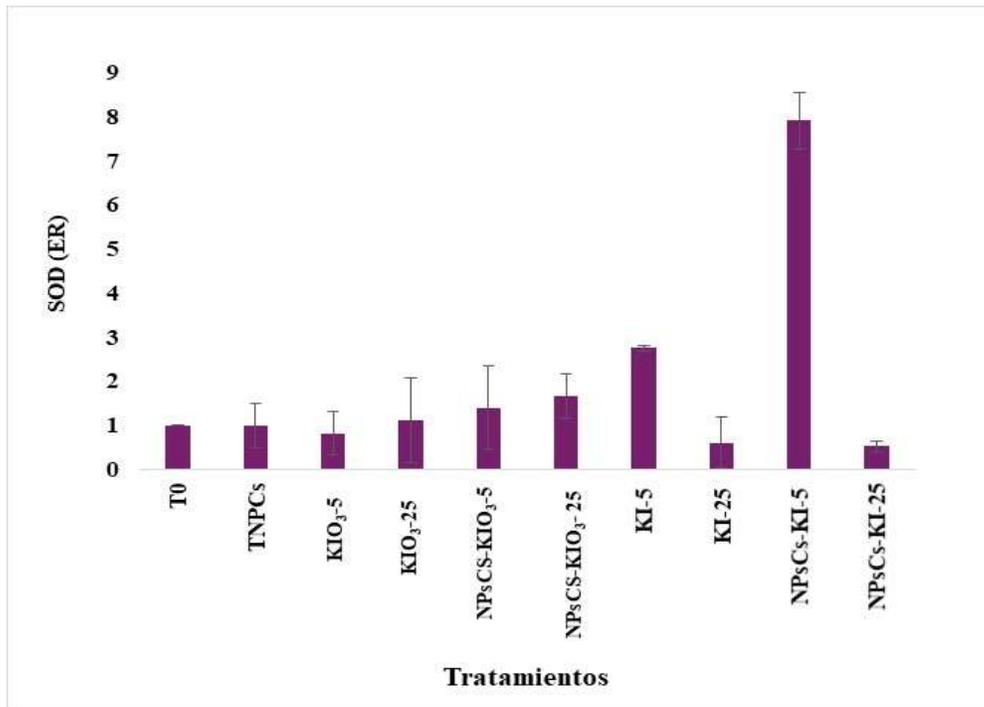


**Figura 5.** Actividad enzimática de CAT. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=5$ ). DDT= días después del trasplante.

## Análisis de expresión génica

### GEN *SOD*

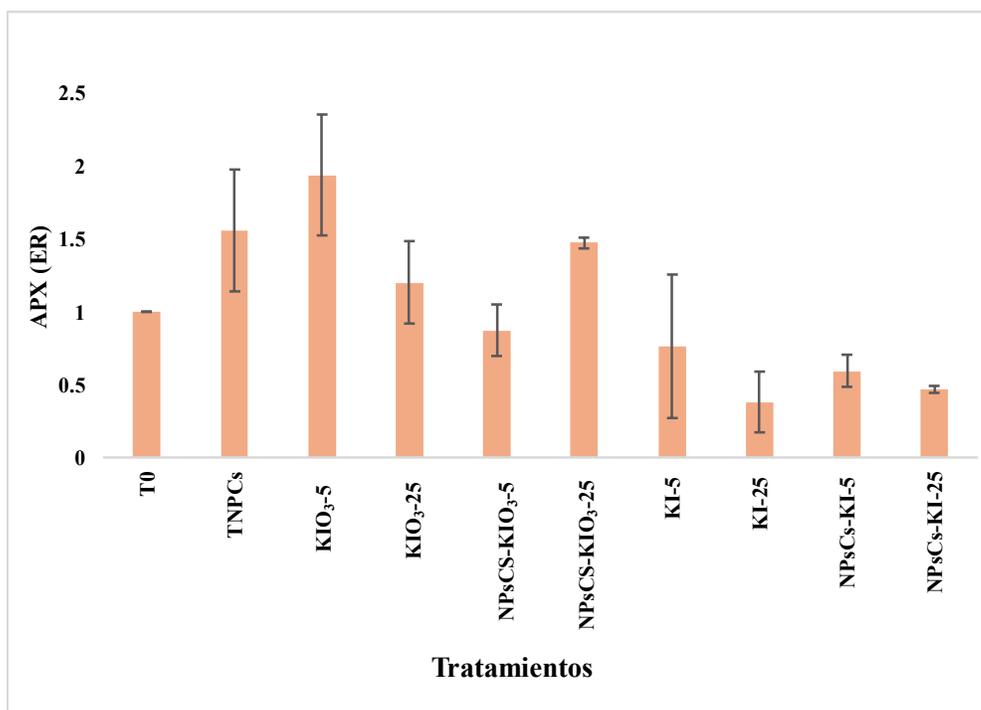
En la Figura 6, se observa la expresión génica de *SOD*, la cual tuvo diferencias significativas en NPsCs-KI-5, ya que se observó un incremento de 6.9 veces respecto al testigo absoluto. La información sobre el impacto de KI en la expresión de *SOD*, es limitada. Sin embargo, el trabajo de Medrano Macías *et al.*, (2016) que investigaron el efecto de la aplicación de yodo en plántulas de tomate observaron que dichos tratamientos no modificaron la expresión de *SOD*, esto debido a que posiblemente hubo una disminución de  $H_2O_2$ . Aunque, por otro lado, la expresión que encontramos de *SOD* en este estudio con el tratamiento de NPsCs-KI-5 podría deberse a que el quitosán tiene la capacidad de actuar como bioestimulante por ende activa genes en las plantas (Lopez Velasquez *et al.*, 2019).



**Figura 6.** Expresión génica del gen *SOD* a los 16 DDT. ER= Expresión relativa. Las barras de error representan la desviación estándar (n=3).

### Gen *APX*

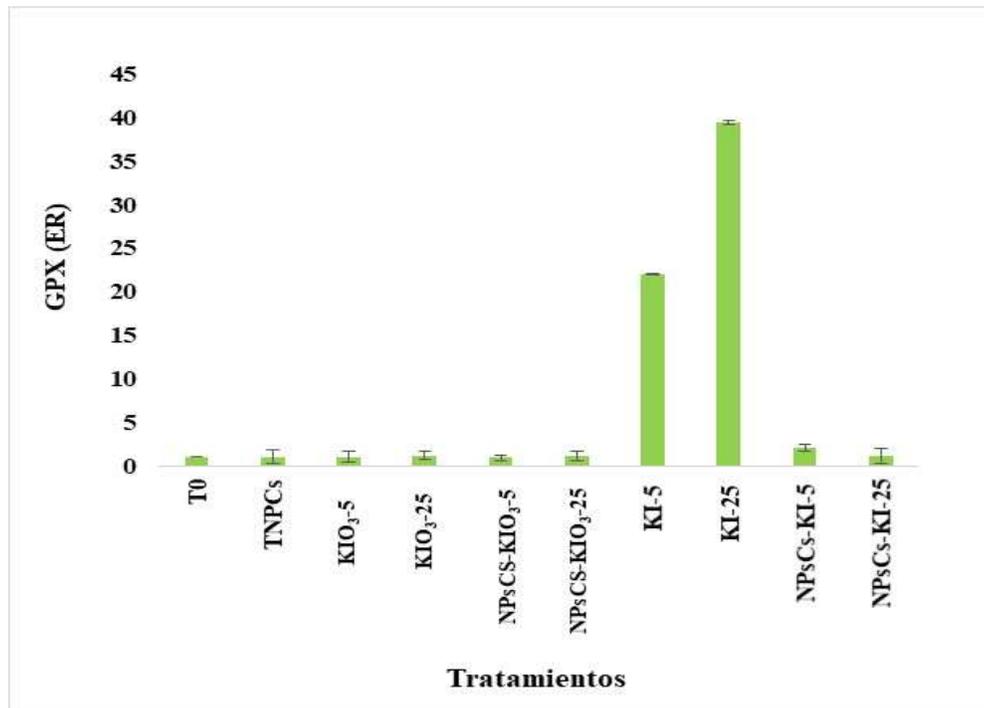
Los resultados muestran que, en este caso, el tratamiento en el que *APX* tuvo mayor expresión génica fue KIO<sub>3</sub>-5, siendo 0.93 veces mayor en comparación al testigo absoluto (Figura 7). Este aumento nos dice que la aplicación de KI puede influir en la regulación de genes antioxidantes como *APX*. El estudio de Zhang *et al.*, (2018) llevó a cabo una investigación de expresión del gen *APX* y *GPX* en *Sorghum bicolor* bajo condiciones de estrés por sequía, sus análisis revelaron que, bajo condiciones de sequía, los genes *APX* mostraron una mayor respuesta en genotipos sensibles en comparación con los tolerantes, indicando una regulación diferente de estos genes según sea la tolerancia al estrés hídrico. Es importante destacar que en este trabajo el objeto de estudio fue evaluar el efecto bioestimulante de los tratamientos aplicados en ausencia al estrés. El comportamiento encontrado nos dice que *APX* podría ser una herramienta importante en la defensa del metabolismo antioxidante de las plantas. Finalmente, Ayuso Calles (2024) menciona que la magnitud de la expresión génica puede variar según el tipo de estrés y la especie vegetal.



**Figura 7.** Expresión génica de *APX* a los 16 DDT. ER= Expresión relativa. Las barras de error representan la desviación estándar (n=3).

### Gen *GPX*

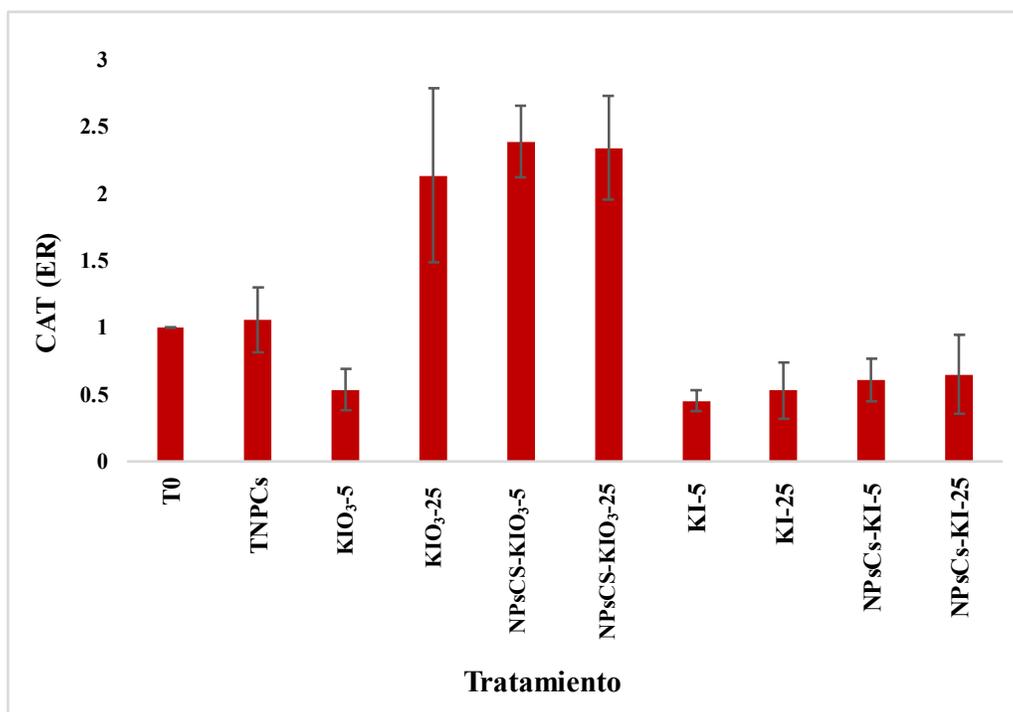
En la Figura 8, observamos la expresión génica de *GPX*. Dichos resultados muestran una diferencia significativa en los tratamientos de KI-5 y KI-25, los cuales fueron 21.98 y 39.44 veces en comparación al testigo absoluto, respectivamente. Este notable aumento nos dice que la aplicación de KI puede estimular significativamente la actividad antioxidante en las plantas. Diversos estudios han demostrado que la expresión de *GPX* puede variar significativamente bajo condiciones de estrés. Por ejemplo, en estudios de Zhang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021 en pepino y arroz, la expresión de *GPX* mejoró la respuesta antioxidante y el crecimiento de dichos cultivos que estuvieron bajo estrés salino y osmótico inducido con manitol, respectivamente. Esto respalda la idea de que el KI actuó como un estresor leve, por ende, hubo la expresión de *GPX* en dichos tratamientos.



**Figura 8.** Expresión génica de *GPX* a los 16 DDT. ER= Expresión relativa. Las barras de error representan la desviación estándar (n=3).

### Gen *CAT*

En cuanto al gen *CAT*, se observó que en los tratamientos de KIO<sub>3</sub>-25, NP<sub>5</sub>CS-KIO<sub>3</sub>-5 y NP<sub>5</sub>CS-KIO<sub>3</sub>-25 su expresión génica fue de 1.13, 1.38 y 1.33 veces mayor al testigo absoluto, respectivamente (Figura 9). Nuestros resultados nos dicen que tanto el KIO<sub>3</sub> como las NP<sub>5</sub>CS pueden influir en la expresión de genes antioxidantes de las plantas. Algunos estudios como los de Lui Zhonghui *et al.*, (2023), quienes trabajaron con tabaco (*Nicotiana tabacum*), identificaron siete genes *CAT* que respondieron de diferente manera a diversas condiciones de estrés abiótico, como sequía, frío y salinidad. Especialmente, bajo estrés por sequía, la expresión génica de *CAT* aumentó significativamente, lo cual indica una respuesta al incremento de ROS. En conclusión, podemos decir que la aplicación de KIO<sub>3</sub> y NP<sub>5</sub>CS puede incrementar la expresión del gen *CAT*, aumentando la capacidad antioxidante de las plantas. Estos resultados coinciden con estudios previos que nos hablan sobre la importancia de *CAT* en la respuesta al metabolismo antioxidante.



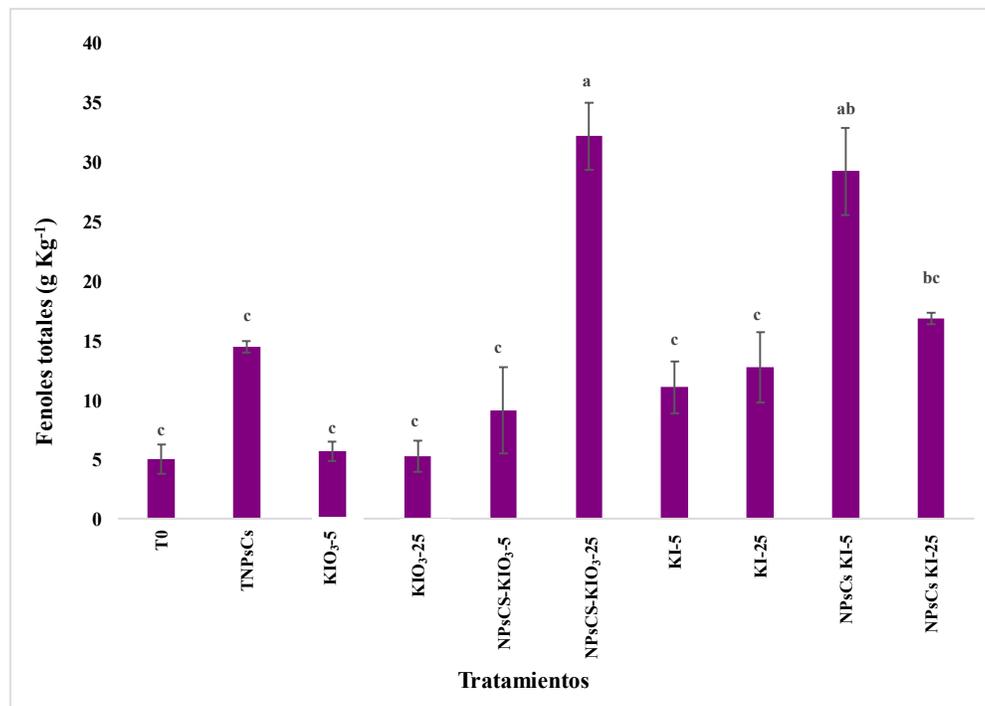
**Figura 9.** Expresión génica de *CAT* a los 16 DDT. ER= Expresión relativa. Las barras de error representan la desviación estándar (n=3).

## Análisis en frutos

### Fenoles

Los resultados del contenido fenoles totales en frutos de tomate de plantas tratadas con NPsCs-I (Figura 10) muestran que el tratamiento con NPsCs-KIO<sub>3</sub>-25 generó diferencias significativas en el contenido, siendo 5.4 veces mayor en comparación con el testigo absoluto (T0). Este hallazgo sugiere que genera un efecto positivo de la combinación de NPsCs con KIO<sub>3</sub> sobre la síntesis de metabolitos secundarios. Sin embargo, existen reportes contrastantes; como lo muestra el estudio de Ramírez Rodríguez *et al.*, (2021), en donde reportaron una disminución significativa de un 7% en cultivos de triticale al aplicar NPsCs a una dosis de 0.8 mg·mL<sup>-1</sup>. Por otro lado, Cortes Pérez (2023), menciona que la aplicación de nanopartículas puede inducir un estrés abiótico leve en las plantas, lo cual activa rutas metabólicas de defensa, como la síntesis de compuestos fenólicos, estas moléculas actúan como antioxidantes naturales, protegiendo a la planta del daño por ROS. En este contexto, la acumulación de fenoles en respuesta a las nanopartículas puede

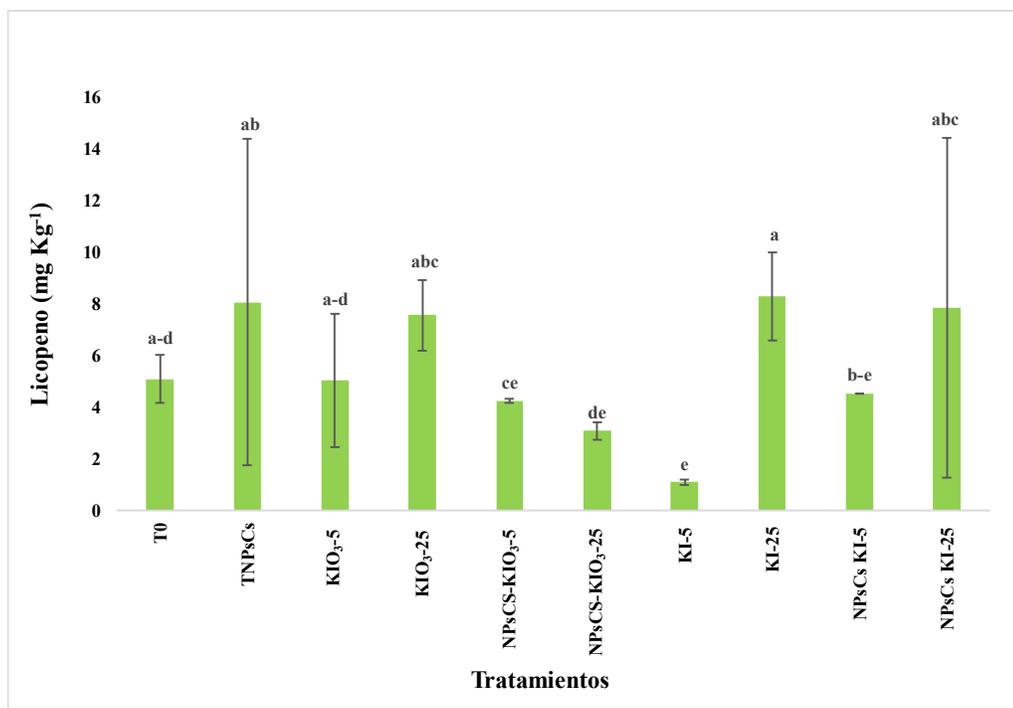
interpretarse como un indicador fisiológico de adaptación al estrés inducido, lo cual también se ha observado en otros cultivos hortícolas como:chile pimiento, calabaza, lechuga, entre otros. (Raliya et al., 2015; López-Vargas et al., 2020; Pérez-Labrada *et al.*, 2019).



**Figura 10.** Fenoles totales. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=3$ ).

## Licopeno

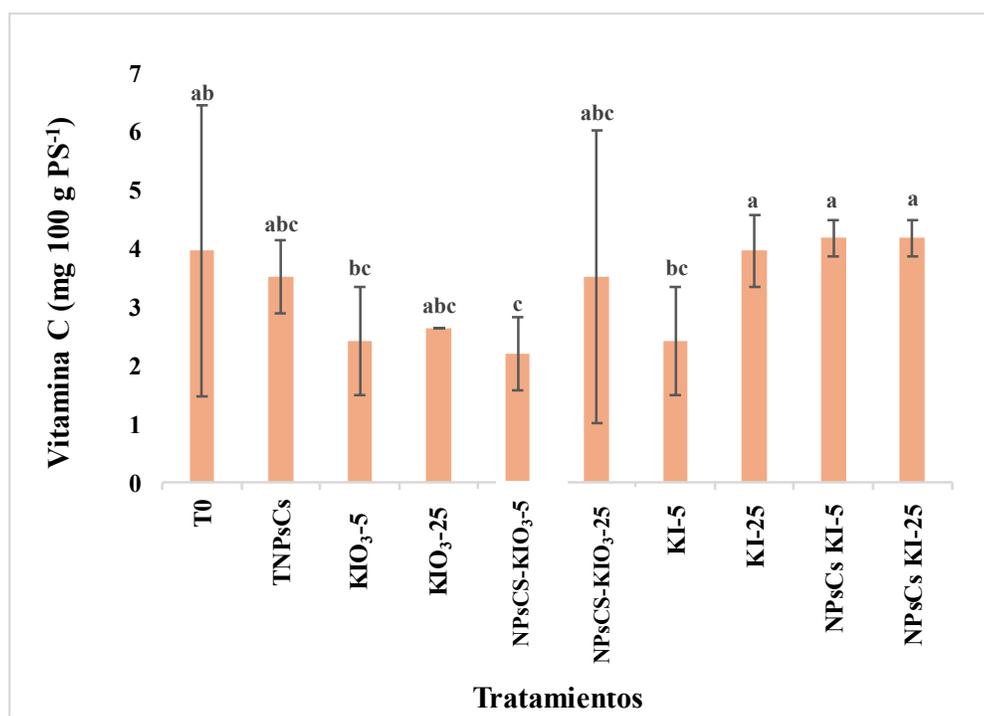
En la Figura 11 podemos observar la concentración de licopeno en cada uno de los tratamientos. No hubo cambios significativos en los resultados, este hallazgo resulta similar en investigaciones previas, por ejemplo, en un estudio realizado por Vázquez López (2016), se evaluó el efecto de nanopartículas de quitosán con cobre sobre el crecimiento y contenido de licopeno en tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en invernadero y, no se registraron diferencias significativas en el contenido de licopeno entre los tratamientos. Se cree que, aunque las NPsCs, KIO<sub>3</sub> y KI pueden actuar como bioestimulantes mejorando el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate, el incremento de licopeno no es significativo debido a que es posible que la síntesis de este carotenoide esté más relacionada con factores ambientales como la intensidad lumínica, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes, etc, que por la aplicación de estos compuestos (Jarquín Enríquez, 2013).



**Figura 11.** Contenido de licopeno. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=3$ ).

## Vitamina C

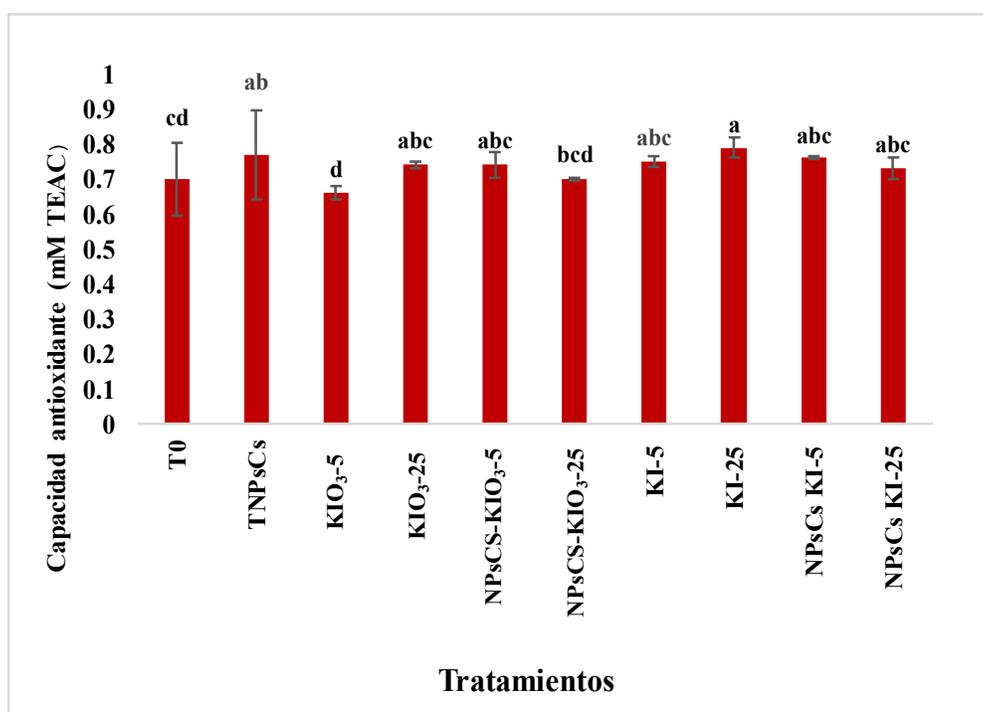
En este estudio no se reportaron diferencias significativas respecto al testigo absoluto en el contenido de Vitamina C, sin embargo, se observó que la aplicación de  $KIO_3$  redujo su contenido un 38.89% y 30.09% respectivamente al T0. Este hecho puede atribuirse a las propiedades oxidantes del yodato, el cual puede oxidar directamente el ácido ascórbico además la aplicación de  $KIO_3$  puede inducir un estrés oxidativo en la planta lo cual activa mecanismos de defensa antioxidantes, siendo consumida en el proceso (Rodríguez Milla *et al.*, 2003).



**Figura 12.** Contenido de Vitamina C. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=3$ ).

### Capacidad antioxidante

En cuanto a la capacidad antioxidante no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 13). Por otro lado, en el estudio de Lara Izaguirre *et al.*, (2023), se reportó un incremento del 42% en la capacidad antioxidante en frutos de tomate tratados con 5 mM de KI en comparación con el testigo absoluto. Además, otros estudios han reportado que la aplicación de NPsCs puede influir en la síntesis de compuestos antioxidantes en diferentes cultivos, favoreciendo su respuesta al estrés oxidativo (Treviño-Ruiz *et al.*, 2023). Por lo que se cree que, aunque en nuestros estudios no se encontraron cambios significativos la aplicación de NPsCs tiene un potencial para mejorar la capacidad antioxidante.



**Figura 13.** Capacidad antioxidante. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD,  $p \leq 0,05$ ). Las barras de error representan la desviación estándar ( $n=3$ ).

## CONCLUSIONES

La aplicación de complejos de nanopartículas de quitosán yodo (NPsCs-I) demostró tener un efecto bioestimulante favorable en el cultivo de tomate, tanto a nivel fisiológico como bioquímico. A lo largo de las evaluaciones, se observó que los tratamientos con NPsCs-I promovieron una mayor síntesis de proteínas y un incremento en la expresión génica y actividad enzimática de SOD, APX, GPX y CAT, especialmente durante las etapas tempranas del desarrollo del cultivo.

De igual manera, se evidenció una expresión génica elevada en los genes relacionados con el sistema antioxidante, particularmente *GPX* y *SOD*, con los tratamientos de NPsCs-KI-5 y NPsCs-KIO<sub>3</sub>-5 y NPsCs-KIO<sub>3</sub>-25.

En cuanto a los frutos, se observó un incremento en el contenido de fenoles totales con el tratamiento NPsCs-KIO<sub>3</sub>-25, sin que esto implicara algún daño en otros parámetros de calidad como el contenido de vitamina C o la capacidad antioxidante.

Esta investigación demostró que los complejos NPsCs-I representan una estrategia prometedora, sustentable y efectiva para mejorar el desempeño fisiológico y nutracéutico del cultivo de tomate. Su implementación podría ser una alternativa viable dentro de los sistemas agrícolas actuales, contribuyendo al desarrollo de tecnologías bioestimulantes más eficientes y amigables con el medio ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amador, C. Á., Algentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., González Aguilera, J., & Reyna, I. F. (2022). Respuesta del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum L.*) a la aplicación de QuitoMax® en condiciones de salinidad. *Research, Society and Development*, 11(12), e10111233870. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.33870>
- Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Caballero, A. H., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
- Builes-Barrera, C. A. (2022). Thyroid function and pregnancy. In *Medicina y Laboratorio* (Vol. 26, Issue 1, pp. 11–13). Universidad de Antioquia. <https://doi.org/10.36384/01232576.556>
- Cabrefiga, J., & Boix, M. (2024). Los bioestimulantes, ¿van a revolucionar la fertilización del futuro? *Vida Rura*, 26–32. Los bioestimulantes, ¿van a revolucionar la fertilización del futuro?
- Danso, O. P., Asante-Badu, B., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Yin, X., & Zhu, R. (2023). Selenium Biofortification: Strategies, Progress and Challenges. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020416>
- David Murillo-Cuevas, F., Cabrera-Mireles, H., Adame-García, J., Vásquez-Hernández, A., de Jesús Martínez-García, A., & Luria Moctezuma, R. (2021). Bioestimulantes en la calidad de frutos de chile habanero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 1473–1481. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2900>
- Eslava-Schmalbach, J., & Eslava-González, L. (2021). Deficiencia de yodo en mujeres gestantes indígenas en Colombia: un problema de equidad y de salud pública. In *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología* (Vol. 72, Issue 1, pp. 7–11). Federacion Colombiana de Asociaciones de Obstetricia y Ginecologia (FECOLSOG). <https://doi.org/10.18597/rcog.3675>
- Eveleigh, E. R., Coneyworth, L. J., Avery, A., & Welham, S. J. M. (2020). Vegans, vegetarians, and omnivores: How does dietary choice influence iodine intake? A systematic review. *Nutrients*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/nu12061606>
- Fabrezi, M., & Cruz, J. C. (2023). El Yodo en la naturaleza (Vol. 13, pp. 10-15). [El yodo en la naturaleza Repositorio de Ciencias Agropecuarias y Ambientales del Noroeste Argentino](#)

- García-García, R. A., Madera-Santana, T. J., Grijalva-Verdugo, C., & Rodríguez-Núñez, J. R. (2024). Elaboración y caracterización de nanopartículas de quitosano como acarreador de péptidos bioactivos. *Jóvenes en la ciencia*, 31, 55–59. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4659>
- Gonzalez-Lemus Uriel. (2021). Nanopartículas de selenio en la agricultura para la alimentación de rumiantes y la disminución de gases de efecto invernadero. *Boletín de Ciencias Agropecuarias Del ICAP*, 10, 33–37. <https://doi.org/10.29057/icap>
- Guzmán Cruz, R., Daniel Hernández Vega, J., & Contreras, I. P. (2021). Propiedades y ventajas del tomate cherry negro. 4(7), 59-76. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/273>
- Harutyunyan, L. R., & Lasareva, E. V. (2023). Chitosan and its Derivatives: A Step Towards Green Chemistry. In *Biointerface Research in Applied Chemistry* (Vol. 13, Issue 6). AMG Transcend Association. <https://doi.org/10.33263/BRIAC136.578>
- Hatch-McChesney, A., & Lieberman, H. R. (2022). Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. In *Nutrients* (Vol. 14, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nu14173474>
- Hemmami, H., Ben Amor, I., Ben Amor, A., Zeghoud, S., Ahmed, S., & Alhamad, A. a. (2024). Chitosan, Its Derivatives, Sources, Preparation Methods, and Applications: A Review. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 11(1), 341–364. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1336313>
- Higinio Ruiz Espinoza, F., José Reyes-Pérez, J., Rivero-Herrada, M., Leonardo García-Bustamante, E., Alfredo Beltran-Morales, F., Higinio Ruiz-Espinoza, F., Quito Km, A., Santo Domingo Quevedo, vía, & Ríos, L. (2020, August 3). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. 22, 156–163. <http://biotecnia.unison.mx>
- Kiferle, C., Gonzali, S., Holwerda, H. T., Ibaceta, R. R., & Perata, P. (2013). Tomato fruits: A good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science*, 4(JUN). <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Kiferle, C., Martinelli, M., Salzano, A. M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P. A., Hora, K., Holwerda, H. T., Scaloni, A., & Perata, P. (2021). Evidences for a

- Nutritional °Role of Iodine in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Kocięcka, J., & Liberacki, D. (2021). The potential of using chitosan on cereal crops in the face of climate change. In *Plants* (Vol. 10, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants10061160>
- Leija-Martínez, P., Benavides-Mendoza, A., Rocha-Estrada, A., & Medrano-Macías, J. R. (2016). Iodine biofortification in plants for human consumption. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 7). [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342016000802025&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000802025&lng=es&tlng=en)
- Lima, Y. C., Bonilla, O. H., & Lucena, E. M. P. de. (2022). Uso da quitosana na agricultura: uma revisão com ênfase na aplicação em sementes. *Research, Society and Development*, 11(2), e39911225782. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25782>
- Lopez-Nataret Aldo Andres. (2022). Evaluación de la microencapsulación de ácidos húmicos y fúlvicos para ser empleados en la fertilización de liberación controlada para plantas de ornato con alto valor comercial. *Journal of Negative & No Positive Results*, 7, 298–316. <https://dx.doi.org/10.19230/jonnpr.4672>
- Medrano Macías, J., Narváez Ortiz, W., Quistián Martínez, D., Benavides Mendoza, A., & Leíja Martínez, P. (2024). Respuesta de la aplicación del yodo sobre antioxidantes, contenido mineral y crecimiento en frutos de tomate. *Revista Politecnica de Aguascalientes* 3.
- Navarro-González, I., & Periago, M. J. (2016). El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? *Revista Espanola de Nutricion Humana y Dietetica*, 20(4), 323–335. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2531>
- Ofori, K. F., Antoniello, S., English, M. M., & Aryee, A. N. A. (2022). Improving nutrition through biofortification—A systematic review. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655>
- Orona-Castillo I. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *Biocencia*, 24, 70–76. <http://biocencia.unison.mx>
- Ramírez Rodríguez, S. C., Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Santos, J. M. N., Orozco Vidal, J. A., & Rangel, P. P. (2021). Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. *Revista Mexicana de Ciencias*

<https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2929>

- Ricardo, B.-V., Alberto, J.-O., Leonel, A.-H., Del, D., Resumen, A., & De, D. (2020). Las fitohormonas una pieza clave en el desarrollo de la agricultura The plant hormones, an important component of the agriculture development Editado por: Selva Andina Research Society. In Journal of the Selva Andina Biosphere ®. Bolivia. All rights reserved. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2308-38592020000200007&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2308-38592020000200007&lng=pt&nrm=iso&tlng=en)
- Rodriguez-Salinas Pablo Alan. (2022). Yodo incrementa la concentración de compuestos fenólicos y pigmentos fotosintéticos en tres cultivares de *Ficus carica* L. sometidos a estrés salino. 309–318 <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3285>
- Romero-Felix Celia Selene. (2023). Bioestimulantes en el crecimiento y rendimiento de *Phaseolus vulgaris* L. en el Norte de Sinaloa. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. <https://doi.org/https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3650>
- Romero-Serrano Id, A., & Pereira, J. (2020). Review: Chitosan, a versatile biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications.
- Saucedo-Plascencia, M. D., Guevara Martínez, S. J., Zamudio-Ojeda, A., & Castillo-Romero, A. (2023). Nanopartículas de quitosano: una prometedora estrategia para combatir la resistencia a antimicrobianos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9562–9575. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.5078](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5078)
- Sharifi-Rad, J., Quispe, C., Butnariu, M., Rotariu, L. S., Sytar, O., Sestito, S., Rapposelli, S., Akram, M., Iqbal, M., Krishna, A., Kumar, N. V. A., Braga, S. S., Cardoso, S. M., Jafernik, K., Ekiert, H., Cruz-Martins, N., Szopa, A., Villagran, M., Mardones, L., ... Calina, D. (2021). Chitosan nanoparticles as a promising tool in nanomedicine with particular emphasis on oncological treatment. In *Cancer Cell International* (Vol. 21, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12935-021-02025-4>
- Sheoran, S., Kumar, S., Ramtekey, V., Kar, P., Meena, R. S., & Jangir, C. K. (2022). Current Status and Potential of Biofortification to Enhance Crop Nutritional Quality: An Overview. In *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14063301>
- Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>

- Thangavelu, A., Stelin, K., Vannala, V., Mahabob, N., Hayyan, F., & Sundaram, R. (2021). An overview of chitosan and its role in periodontics. In *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences* (Vol. 13, Issue 5, pp. S15–S18). Wolters Kluwer Medknow Publications. [https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS\\_701\\_20](https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_701_20)
- Thangavelu, A., Stelin, K., Vannala, V., Mahabob, N., Hayyan, F., & Sundaram, R. (2021). An overview of chitosan and its role in periodontics. In *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences* (Vol. 13, Issue 5, pp. S15–S18). Wolters Kluwer Medknow Publications. [https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS\\_701\\_20](https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_701_20)
- Rodríguez-Cabello, Jesús, Pérez-González, Aymara, Ortega-García, Loreilys, & Arteaga-Barrueta, Mayra. (2020). Estudio hidrosostenible en el cultivo del tomate, su efecto en el rendimiento y calidad del fruto. *Cultivos Tropicales*, 41(2). Epub 19 de marzo de 2020. Recuperado en 09 de marzo de 2025, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000200006&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000200006&lng=es&tlng=es).
- Valdes Marquez Humberto. (2023). Efecto de extractos vegetales sobre el cultivo de la habichuela. *Avances*, 25, 410–423. <https://orcid.org/0000-0003-2698-8195>
- Valverde-Lucio, Y., Moreno-Quinto, J., Quijije-Quiroz, K., Castro-Landín, A., Merchán-García, W., & Gabriel-Ortega, J. (2020). Los bioestimulantes. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11(1), 18–28. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2020.110100018>
- Xxi, V., Caro-León, F. J., López-Martínez, L. M., Lizardi-Mendoza, J., Argüelles-Monal, W., Goycoolea-Valencia, F. M., Carvajal-Millán, E., López-Franco, Y. L., & para correspondencia, A. (2019). Métodos de preparación de nanopartículas de quitosano: una revisión. *Biotecnia*, 21, 13–25. <http://biotecnia.unison.mx>
- Amador, C. Á., Argente-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., González Aguilera, J., & Reyna, I. F. (2022). Respuesta del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de QuitoMax® en condiciones de salinidad. *Research, Society and Development*, 11(12), e10111233870. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.33870>
- Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Caballero, A. H., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
- López-Nataret, Aldo Andrés, Matías-Pérez, Diana, Sánchez-Medina, Marco Antonio, & García-Montalvo, Iván Antonio. (2022). Evaluación de la microencapsulación de ácidos húmicos y fúlvicos para ser empleados en la fertilización de liberación

- controlada para plantas de ornato con alto valor comercial. *Journal of Negative and No Positive Results*, 7(3), 298-316. Epub 26 de septiembre de 2022. <https://dx.doi.org/10.19230/jonnpr.4672>
- Romero-Félix, Celia Selene, Paso, Damaris Fabiola Pellegaud-del, Salas-Arellanes, Juan Antonio, Saucedo-Acosta, Raúl Hipólito, Buelna-Tarín, Salomón, & López-Valenzuela, Blanca Elvira. (2023). Bioestimulantes en el crecimiento y rendimiento de *Phaseolus vulgaris* L. en el Norte de Sinaloa. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(2), e3650. Epub 22 de septiembre de 2023. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3650>
- Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP. (2025). <https://doi.org/10.29057/icap>
- Builes-Barrera, C. A. (2022). Thyroid function and pregnancy. In *Medicina y Laboratorio* (Vol. 26, Issue 1, pp. 11–13). Universidad de Antioquia. <https://doi.org/10.36384/01232576.556>
- Danso, O. P., Asante-Badu, B., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Yin, X., & Zhu, R. (2023). Selenium Biofortification: Strategies, Progress and Challenges. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020416>
- Cabrefiga, J., & Boix, M. (2024). Los bioestimulantes, ¿van a revolucionar la fertilización del futuro?. *Vida Rural*, 2024, 550, Mayo, 26-32. <http://hdl.handle.net/20.500.12327/3077>
- Murillo-Cuevas, F. D., Cabrera-Mireles, H., Adame-García, J., Vásquez-Hernández, A., Martínez-García, A. D. J., & Moctezuma, R. L. (2021). Bioestimulantes en la calidad de frutos de chile habanero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), 1473-1481. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2900>
- Márquez, H. V., Martín, G. M. P., & la Hoz Hernández, L. J. (2023). Efecto de la aplicación de extractos vegetales en *Vigna unguiculata* ssp. *sesquipedalis* var. Cantón-1. *Avances*, 25(3), 410-423. <https://orcid.org/0000-0003-2698-8195>
- Eslava-Schmalbach, J., & Eslava-González, L. (2021). Deficiencia de yodo en mujeres gestantes indígenas en Colombia: un problema de equidad y de salud pública. In *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología* (Vol. 72, Issue 1, pp. 7–11). Federacion Colombiana de Asociaciones de Obstetricia y Ginecologia (FECOLSOG). <https://doi.org/10.18597/rcog.3675>
- Eveleigh, E. R., Coneyworth, L. J., Avery, A., & Welham, S. J. M. (2020). Vegans, vegetarians, and omnivores: How does dietary choice influence iodine intake? A systematic review. *Nutrients*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/nu12061606>

- Fabrezi, M., & Cruz, J. C. (2023). El Yodo en la naturaleza *Temas de Biología y Geología del NOA*, 13(2), 10-15.
- Guzmán Cruz, R., Daniel Hernández Vega, J., & Contreras, I. P. (2021). Properties and advantages of black cherry tomato Propiedades y ventajas del tomate cherry negro. *Perspectivas de la ciencia y la tecnología*, 4(7), 59-76. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/273>
- Harutyunyan, L. R., & Lasareva, E. V. (2023). Chitosan and its Derivatives: A Step Towards Green Chemistry. In *Biointerface Research in Applied Chemistry* (Vol. 13, Issue 6). AMG Transcend Association. <https://doi.org/10.33263/BRIAC136.578>
- Hatch-McChesney, A., & Lieberman, H. R. (2022). Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. In *Nutrients* (Vol. 14, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nu14173474>
- Hemmami, H., Amor, I. B., Amor, A. B., Zeghoud, S., Ahmed, S., & Alhamad, A. A. (2024). Chitosan, its derivatives, sources, preparation methods, and applications: A review. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 11(1), 341-364. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1336313>
- Kiferle, C., Gonzali, S., Holwerda, H. T., Ibaceta, R. R., & Perata, P. (2013). Tomato fruits: A good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science*, 4(JUN). <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Kiferle, C., Martinelli, M., Salzano, A. M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P. A., Hora, K., Holwerda, H. T., Scaloni, A., & Perata, P. (2021). Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Kocięcka, J., & Liberacki, D. (2021). The potential of using chitosan on cereal crops in the face of climate change. In *Plants* (Vol. 10, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants10061160>
- Leija-Martínez, P., Benavides-Mendoza, A., Rocha-Estrada, A., & Medrano-Macías, J. R. (2016). Iodine biofortification in plants for human consumption. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 7).
- Lima, Y. C., Bonilla, O. H., & Lucena, E. M. P. de. (2022). Uso da quitosana na agricultura: uma revisão com ênfase na aplicação em sementes. *Research, Society and Development*, 11(2), e39911225782. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25782>

- Medrano Macías, J., Narváez Ortiz, W., Quistián Martínez, D., Benavides Mendoza, A., & Leíja Martínez, P. (n.d.). Respuesta de la aplicación del yodo sobre antioxidantes, contenido mineral y crecimiento en frutos de tomate.
- Navarro-González, I., & Periago, M. J. (2016). Is tomato a healthy and/or functional food? *Revista Espanola de Nutricion Humana y Dietetica*, 20(4), 323–335. <https://doi.org/10.14306/renhyd.20.4.208>
- Ofori, K. F., Antoniello, S., English, M. M., & Aryee, A. N. A. (2022). Improving nutrition through biofortification—A systematic review. In *Frontiers in Nutrition* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655>
- Ramírez Rodríguez, S. C., Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Santos, J. M. N., Orozco Vidal, J. A., & Rangel, P. P. (2021). Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2929>
- Ricardo, B.-V., Alberto, J.-O., Leonel, A.-H., Del, D., Resumen, A., & De, D. (2020). Las fitohormonas una pieza clave en el desarrollo de la agricultura The plant hormones, an important component of the agriculture development Editado por: Selva Andina Research Society. In *Journal of the Selva Andina Biosphere* ®. Bolivia. All rights reserved.
- Romero Serrano, A., & Pereira, J. (2020). Chitosan, a versatil biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications. *Ingeniería UC*, 118-135.
- Reyes-Pérez, Juan José, Rivero-Herrada, Marisol, García-Bustamante, Erick Leonardo, Beltran-Morales, Félix Alfredo, & Ruiz-Espinoza, Francisco Higinio. (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. *Biotecnia*, 22(3), 156-163. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1338>
- Orona-Castillo, I, Del-Toro-Sánchez, CL, Fortis-Hernández, M, Preciado-Rangel, P, Espinoza-Arellano, JJ, Rueda-Puente, E, Flores-Vázquez, M, & Cano-Ríos, P. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *Biotecnia*, 24(3), 70-76. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1721> <http://biotecnia.unison.mx>
- Saucedo-Plascencia, M. D., Guevara Martínez, S. J., Zamudio-Ojeda, A., & Castillo-Romero, A. (2023). Nanopartículas de quitosano: una prometedora estrategia para

- combatir la resistencia a antimicrobianos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9562–9575. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rem.v7i1.5078](https://doi.org/10.37811/cl_rem.v7i1.5078)
- Sharifi-Rad, J., Quispe, C., Butnariu, M., Rotariu, L. S., Sytar, O., Sestito, S., Rapposelli, S., Akram, M., Iqbal, M., Krishna, A., Kumar, N. V. A., Braga, S. S., Cardoso, S. M., Jaferník, K., Ekiert, H., Cruz-Martins, N., Szopa, A., Villagran, M., Mardones, L., ... Calina, D. (2021). Chitosan nanoparticles as a promising tool in nanomedicine with particular emphasis on oncological treatment. In *Cancer Cell International* (Vol. 21, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12935-021-02025-4>
- Sheoran, S., Kumar, S., Ramtekey, V., Kar, P., Meena, R. S., & Jangir, C. K. (2022). Current Status and Potential of Biofortification to Enhance Crop Nutritional Quality: An Overview. In *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 14, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14063301>
- Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>
- Thangavelu, A., Stelin, K., Vannala, V., Mahabob, N., Hayyan, F., & Sundaram, R. (2021). An overview of chitosan and its role in periodontics. In *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences* (Vol. 13, Issue 5, pp. S15–S18). Wolters Kluwer Medknow Publications. [https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS\\_701\\_20](https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_701_20)
- Thangavelu, A., Stelin, K., Vannala, V., Mahabob, N., Hayyan, F., & Sundaram, R. (2021). An overview of chitosan and its role in periodontics. In *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences* (Vol. 13, Issue 5, pp. S15–S18). Wolters Kluwer Medknow Publications. [https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS\\_701\\_20](https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_701_20)
- Valverde-Lucio, Y., Moreno-Quinto, J., Quijije-Quiroz, K., Castro-Landín, A., Merchán-García, W., & Gabriel-Ortega, J. (2020). Los bioestimulantes. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11(1), 18–28. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2020.110100018>
- Caro-León, F. J., López-Martínez, L. M., Lizardi-Mendoza, J., Argüelles-Monal, W., Goycoolea-Valencia, F. M., Carvajal-Millán, E., & López-Franco, Y. L. (2019). Metodos de preparación de nanoparticulas de quitosan; una reseña. *BIOtecnia*, 21(3), 13-25. <http://biotecnia.unison.mx>

- Raza, A., Su, W., Gao, A., Mehmood, S. S., Hussain, M. A., Nie, W., ... & Zhang, X. (2021). Catalase (CAT) gene family in rapeseed (*Brassica napus* L.): Genome-wide analysis, identification, and expression pattern in response to multiple hormones and abiotic stress conditions. *International journal of molecular sciences*, 22(8), 4281. doi:10.3390/ijms22084281.
- Panchuk II, Zentgraf U, Volkov RA. Expression of the Apx gene family during leaf senescence of *Arabidopsis thaliana*. *Planta*. 2005 Nov;222(5):926-32. doi: 10.1007/s00425-005-0028-8. Epub 2005 Jul 21. PMID: 16034597.
- Liu, Z.; Wang, D.; Tang, H.; Li, H.; Zhang, X.; Dong, S.; Zhang, L.; Yang, L. Identification and Analysis of the Catalase Gene Family Response to Abiotic Stress in *Nicotiana tabacum* L. *Agronomy* (2023) 13, 936. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030936>
- Batista-Sánchez, Daulemys, Murillo-Amador, Bernardo, Ojeda-Silvera, Carlos Michel, Mazón-Suástegui, José Manuel, Preciado-Rangel, Pablo, Ruiz-Espinoza, Francisco Higinio, & Agüero-Fernández, Yuneisy Milagro. (2022). Inducción de un bioestimulante y su respuesta en la actividad bioquímica de *Ocimum basilicum* L. sometida a salinidad. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(2), e3185. Epub 02 de junio de 2023. <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3185>
- Carvajal Carvajal, Carlos. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Medicina Legal de Costa Rica*, 36(1), 91-100. Recuperado el 06 de marzo de 2025, de [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152019000100091&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152019000100091&lng=en&tlng=es).
- Herrera Flores, Teresa Susana, Ortiz Cereceres, Joaquín, Delgado Alvarado, Adriana, & Acosta Galleros, Jorge Alberto. (2014). Contenido de osmoprotectores, ácido ascórbico y ascorbato peroxidasa en hojas de frijol sometidas a estrés por sequía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(5), 859-870. Recuperado en 06 de marzo de 2025, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342014000500011&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000500011&lng=es&tlng=es).
- Medrano-Macías, Julia, Leija-Martínez, Paola, Juárez-Maldonado, Antonio, Rocha-Estrada, Alejandra, & Benavides-Mendoza, Adalberto. (2016). Efecto de la

- aplicación de yodo sobre antioxidantes en plántulas de jitomate. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 22(2), 133-143. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.12.025>
- Pérez-Hernández, Hermes, López-Valdez, Fernando, Juárez-Maldonado, Antonio, Méndez-López, Alonso, Sarabia-Castillo, César Roberto, García-Mayagoitia, Selvia, Torres-Gómez, Andrés.
- Patricio, Valle-García, Jessica Denisse, & Pérez-Moreno, Andrea Yakelín. (2024). Implicaciones de los nanomateriales utilizados en la agricultura: una revisión de literatura de los beneficios y riesgos para la sustentabilidad. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 17(32), e00091. Epub 01 de abril de 2024. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69720>
- Ramírez Rodríguez, Silvia C., Ortega Ortiz, Hortensia, Fortis Hernández, Manuel, Nava Santos, Juan M., Orozco Vidal, Jorge A., & Preciado Rangel, Pablo. (2021). Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(4), 579-589. Epub 21 de febrero de 2022. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2929>
- Díaz-Martínez, Juan M., Aispuro-Hernández, Emmanuel, Vargas-Arispuro, Irasema, Falcón-Rodríguez, Alejandro B., & Martínez-Téllez, Miguel Á. (2018). Los derivados de quitosano inducen la expresión local y a distancia de genes de protección en plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Agrociencia*, 52(4), 497-509. Retrieved March 06, 2025, from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000400497&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000400497&lng=en&tlng=es).
- Treviño-Ruiz, Karla Stephanie, Ortega-Ortiz, Hortensia, Benavides-Mendoza, Adalberto, & González-Morales, Susana. (2024). Aplicación de nanoquitosán-yodo en lechuga y su efecto en la biofortificación, crecimiento y rendimiento. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(2), e3615. Epub 23 de agosto de 2024. <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3615>
- Guija-Guerra, Henry, & Guija-Poma, Emilio. (2023). Radicales libres y sistema antioxidante. *Horizonte Médico (Lima)*, 23(2), e2158. Epub 30 de mayo de 2023. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2023.v23n2.12>.

- Martínez, W. Z., Morales, S. G., Godina, F. R., Olivo, A. R., & Maldonado, A. J. (2021). Efecto de los ácidos fenólicos en el sistema antioxidante de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.). *Agronomía mesoamericana*, 32(3), 854-868.
- Cecerska-Heryć, E., Surowska, O., Heryć, R., Serwin, N., Napiontek-Balińska, S., & Dołęgowska, B. (2021). Are antioxidant enzymes essential markers in the diagnosis and monitoring of cancer patients—a review. *Clinical biochemistry*, 93, 1-8.
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25.
- Yagual, D. L. A., Pillasagua, J. J. P., & Reyes, J. M. P. (2022). Deficiencia de oligoelementos: fisiopatología, diagnóstico y efectos en gestantes y niños. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(4), 23-32.
- Fernández, EA, Peraza, MHS, Angeles, HAE, García, COS, Saint Jean, CH, & Martín, NIM (2017, julio). Yodurias y consumo de lácteos en preescolares del Área Suroccidental de Asturias. En *Anales de Pediatría* (Vol. 87, N° 1, pp. 18-25). Elsevier Doyma.
- Chiquito-Contreras, Roberto Gregorio, Reyes-Pérez, Juan José, Troyo-Diéguéz, Enrique, Rueda-Puente, Edgar Omar, Torres-Rodríguez, Juan Antonio, & Murillo-Amador, Bernardo. (2018). Crecimiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con humato de vermicompost. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(spe20), 4187-4197. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.989>
- Ayuso Calles, M. (2024). Caracterización del volatiloма y efecto de la inoculación de cepas de los géneros *Pseudomonas*, *Priestia* y *Rhizobium* en la variación de la expresión génica referida a la mitigación del estrés salino vegetal y análisis de la influencia de los compuestos fenólicos en el sistema modelo in vivo *Caenorhabditis elegans*
- Ogidan, O. A., Oluwasemire, K. O., Akinboade, O. A., Adesida, O. A., & Ekaun, A. A. (2024). Growth and yield of tomato as influenced by water stress at different phenological stages. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 23(1). <https://doi.org/10.4314/gjass.v23i1.1>

López-Vargas, E. R., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., & Juárez-Maldonado, A. (2021). El tratamiento de semillas con nanomateriales de carbono impacta en el crecimiento y absorción de nutrientes en tomate bajo estrés salino. *Revista Bio Ciencias*, 8, e1090. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1090>