

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto de Nanocompuestos a base de Quitosano-Alginato en el Crecimiento Vegetativo y Radicular de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

**JESUS PACHECO AMARO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISION DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto de Nanocompuestos a base de Quitosano-Alginato en el Crecimiento Vegetativo y  
Radicular de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

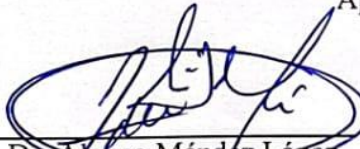
**JESUS PACHECO AMARO**


TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**


Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Alonso Méndez López  
Asesor Principal

  
Dra. Miriam Sánchez Vega  
Coasesor

  
Dra. Rebeca Betancourt Galindo  
Asesor Principal Externo

  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Coasesor

  
Dr. Alberto Sandoval Ramírez  
Coordinador de la División



Saltillo, Coahuila, México.  
Junio, 2024.

## Declaración de no plagio

El autor es responsable directo, jura bajo protesta de decir la verdad que no se ocurrió en plagio o conducta académica incorrectas en los siguientes aspectos:

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

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Jesús Pacheco Amaro

Firma y Nombre

Asesor



Dr. Alonso Méndez López

Firma y Nombre

## **AGRADECIMIENTOS**

### A mi Alma Terra Mater

Le agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme permitido pertenecer en esta casa de estudios durante el tiempo que duro mi carrera y durante este convertirse en mi segunda casa, por todas las experiencias vividas y por todos los momentos tanto académicos como personales que viví y sobre todo gracias por mi formación como Ingeniero Agrónomo en Horticultura.

A mi asesor Dr. Alonso Méndez López por su atención, apoyo y consejos durante el proceso de la elaboración de este proyecto y por compartir sus conocimientos para que este mismo se pudiera llevar a cabo de la mejor manera.

A mis amigos de la universidad Ortiz Cedillo Marco Antonio, López Vásquez Ana Patricia, Hernández Jiménez Joselyn y Mejía García Yazmín por estar a mi lado durante el transcurso de nuestra formación y por todos los consejos brindados.

## **DEDICATORIAS**

### A DIOS

Agradezco a dios por haberme guiado por un buen camino, por cuidarme siempre para donde iba y brindarme la oportunidad de vivir todas y cada una de estas experiencias.

### A mis padres

**Jesus Pacheco Flores** y **Yaneth Amaro Fuentes** gracias por todo el apoyo que me han brindado toda la vida por los consejos los aprendizajes y sobre todo por su esfuerzo que han hecho, este logro sin ustedes no se hubiera podido concretar, por guiarme de la mejor manera por enseñarme muchos de los mejores valores de la vida y enseñarme que con esfuerzo y trabajo se puede conseguir lo que se desee y lo que se proponga.

### A mis hermanos

**Jair Pacheco Amaro** y **Valentino Pacheco Amaro** por estar apoyándome y animándome en momentos que han sido difíciles se los agradezco mucho.

Gracias todos mis tíos, tías, primos y abuelos porque todos y cada uno en algún momento me apoyaron y me aconsejaron y se los agradezco mucho a todos

**Maria Fernanda Benites Bagui** gracias por el apoyo que me brindaste durante una parte de mi proceso académico y por seguir conmigo a pesar de todo y crecer juntos

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.2	General .....	2
1.3	Especifico .....	2
1.4	HIPOTESIS.....	3
<b>II.</b>	<b>LITERATURA REVISADA .....</b>	<b>3</b>
2.1	Nanotecnología.....	3
2.1.1	Nanotecnología aplicada en la agricultura .....	3
2.1.2	Nanomateriales .....	5
2.1.3	Características .....	5
2.1.4	Composición .....	5
2.1.5	Modo de acción.....	6
2.1.6	Mecanismo de acción.....	7
2.2	Quitosano .....	8
2.2.1	Características .....	9
2.2.2	Funciones como estimulante vegetal .....	10
2.3	Alginato.....	12
2.3.1	Características .....	12
2.3.2	Funciones como estimulante vegetal .....	13
2.4	JITOMATE (Solanum lycopersicum).....	14
2.4.1	Antecedentes del cultivo .....	14
2.4.2	Manejo del cultivo.....	14
2.4.3	Requerimientos edafoclimáticos .....	15
2.5	Importancia nacional e internacional .....	17
2.5.1	Nacional.....	17
2.5.2	Internacional .....	18
2.5.3	Aportes nutrimentales .....	18
2.5.4	Producción en México .....	18
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>20</b>
3.1.1	Ubicación del experimento .....	20
3.1.2	Coordenadas geográficas .....	20

3.1.3	Material vegetativo utilizado.....	20
3.1.4	Establecimiento del cultivo .....	21
3.1.5	Establecimiento del experimento.....	21
3.1.6	Trasplante .....	21
3.1.7	Aplicación de tratamientos.....	21
3.1.8	Control de plagas y enfermedades.....	21
3.1.9	Síntesis de Materiales.....	22
3.1.10	Gelación Iónica.....	22
3.1.11	Síntesis de nanopartículas de quitosano con alginato.....	22
3.1.12	Síntesis de nanopartículas de quitosano modificadas con alginato de sodio utilizando TPP como agente entrecruzante. ....	23
3.1.13	Caracterización.....	23
3.1.14	Dispersión de Luz Dinámica (DLS) .....	23
3.1.15	Espectroscopia de infrarrojo (FTIR).....	23
3.1.16	Microscopía electrónica de barrido .....	24
3.2	Variables evaluadas .....	24
3.2.1	Actividad fotosintética (SPAD) .....	24
3.2.2	Altura (cm).....	24
3.2.3	Grosor de tallo (mm) .....	25
3.2.4	Peso fresco foliar (g).....	25
3.2.5	Peso fresco raíz (g).....	25
3.2.6	Volumen de raíz (ml) .....	25
3.2.7	Longitud de raíz (cm).....	25
3.2.8	Peso seco raíz (g) .....	25
3.2.9	Peso seco foliar (g).....	26
3.3	Análisis estadístico.....	26
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>26</b>
4.1	Actividad fotosintética .....	28
4.2	Altura de planta .....	29
4.3	Grosor de tallo .....	30
4.4	Peso fresco foliar.....	31
4.5	Peso fresco de raíz .....	33
4.6	Volumen de raíz .....	34

4.7	Longitud de raíz .....	35
4.8	Peso seco raíz.....	36
4.9	Peso seco foliar .....	37
<b>V.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>39</b>
<b>VI.</b>	<b>Bibliografías .....</b>	<b>39</b>

### Indice de figuras

Figura 1.	Contribución porcentual de jitomate .....	19
Figura 2.	Ubicación geográfica del invernadero usado para el experimento.....	20
Figura 3:	Espectro IR de alginato de sodio, Tpp, quitosano y maltodextrina (MDX).....	27
Figura 4:	Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido de las muestras de NpsQsAlgTpp .....	27
Figura 5.	Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre la actividad fotosintética en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	28
Figura 6.	Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre la altura en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	29
Figura 7.	Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre grosor de tallo en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 8.	Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre el peso fresco foliar en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	32
Figura 9.	Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A el peso fresco de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	33



Figura 10. Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en el volumen de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	34
Figura 11. Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en la longitud de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	36
Figura 12. Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en peso seco de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	37
Figura 13. Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en el peso seco foliar en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).....	38

#### Indice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Temperaturas críticas para el cultivo de tomate.....	<b>17</b>
--	-----------

## Resumen

En la actualidad la agricultura se encuentra en un cambio donde uno de los problemas que más resalta es el uso indiscriminado de agroquímicos, lo cual lleva a un rápido deterioro del suelo y del medio ambiente, por lo que se ha implementado otro tipo de métodos que no solo sean más amigables con estos, sino que también se pueda generar una eficiencia con ellos, lo cual lleve a un mejor aprovechamiento y así disminuyan las cantidades aplicadas en este entorno, una opción viable es la nanotecnología, la cual trae una renovación como son los nanocompuestos y sus beneficios. El objetivo del presente trabajo es observar y determinar el efecto y la concentración que causa el nanocompuesto (quitosano- alginato) en el crecimiento y desarrollo de plántulas de jitomate variedad pai pai. Se evaluaron 5 tratamientos a base de (quitosano- alginato) siendo el T1 (testigo), T2 (100 ppm), T3 (250 ppm), T4 (500 ppm) y T5 (1000 ppm) con las variables de actividad fotosintética (SPAD), altura de la planta, grosor de tallo (GT), peso fresco foliar (PFF), peso fresco raíz (PFR), volumen de raíz (VR), longitud de raíz (LR), peso seco raíz (PSR) y peso seco foliar (PSF), con 8 repeticiones por tratamiento. El análisis de comparación de medias LDS Fisher ( $\alpha \leq 0.05$ ) reveló que las aplicaciones al sustrato del T3, presentaron diferencia significativa en las GT ya que promovió un 6.7% más en comparación al testigo, en la variable PFF el T4 también demostró una diferencia significativa al promover 9.3% en comparación al testigo, en la variable LR el T3 tuvo un incremento del 10.3% en comparación a el T1, la variable PSR el T4 mostro mayor incremento con un 26.7%.

**Palabras clave : Nanomaterial, nanocompuesto, quitosano y alginato.**

## I. INTRODUCCION

El jitomate es una de las principales hortalizas cultivadas en el mundo debido a la gran demanda que existe del producto y a las importantes ganancias económicas que genera su comercialización, además de todas las vitaminas y proteínas que este aporta. Actualmente se cultiva una gran diversidad de variedades de jitomates en casi todo el mundo y esta práctica se realiza principalmente bajo condiciones ambientales controladas (invernaderos) y nutrientes específicos para obtener un mejor rendimiento y calidad. (INECOL, 2020).

En el 2030, se estima un aumento en la demanda mundial de 8.92 a 11.78 MMt (un crecimiento acumulado de 32.10%), y se ha recomendado invertir en el mantenimiento y mejoramiento fitosanitario para diversificar las exportaciones, además de invertir en técnicas más viables para evitar la sobre explotación del suelo utilizando métodos o materiales más amigables con el agroecosistema (SADER, 2017).

El cambio climático y la evolución de la sociedad exigen una optimización de las prácticas agrícolas y/o nuevas tendencias para lograr una agricultura sostenible. Por lo que, el surgimiento de tecnologías novedosas, como la ciencia de los nano materiales se dirige como una excelente alternativa para coadyuvar con la agricultura desde la germinación y cultivo hasta la cosecha, incluyendo la distribución y el almacenamiento de los productos agrícolas (Rodríguez y Cervantes, 2024).

En este contexto la nanotecnología ha mostrado un potencial prometedor para promover la agricultura sostenible. Los nanomateriales desempeñan un papel importante en relación con el destino, la movilidad y la toxicidad de los contaminantes del suelo y son parte esencial de diferentes estrategias de remediación bióticas y abióticas (Usman et al., 2020). Los nanomateriales se presentan como un sustituto de los agro insumos convencionales, debido a sus atributos y la mejora que estos representan, como la gran eficiencia en la liberación dirigida y controlada de agroquímicos, lo que se traduce en una mayor efectividad biológica, al lograr, en general, un aumento en el rendimiento y la productividad de los cultivos (Vázquez-Núñez, 2023).

Los nanomateriales ofrecen una plataforma para el suministro controlado de fertilizantes, la mediación de contaminantes del agua y el aire, así como para el control de algunos microorganismos fitopatógenos que colonizan cultivos en la agricultura actual. La síntesis de nanomateriales factibles, junto con su evaluación estandarizada a nivel mundial, es importante para obtener una nueva generación de técnicos y científicos en el desarrollo de técnicas emergentes y cambios en la agricultura (Rodríguez y Cervantes, 2024).

En la agricultura, las mayores esperanzas surgen de la posibilidad de utilizar el quitosano como bioestimulante, producto fitosanitario, inductor o agente para aumentar la estabilidad en almacenamiento de materias primas vegetales. Las propiedades más importantes del quitosano incluyen la inducción de mecanismos de defensa de las plantas y la regulación de procesos metabólicos. Además, tiene actividad antifúngica, antibacteriana, antiviral y antioxidante (Stasińska-Jakubas y Hawrylak-Nowak, 2022).

Las plantas están continuamente expuestas a una amplia gama de patógenos, incluidos hongos, bacterias, nematodos y virus; por lo tanto, la supervivencia requiere un sistema de defensa sofisticado. Recientemente, los compuestos inductores naturales, como los alginatos, se han convertido en un foco de interés debido a su naturaleza respetuosa con el medio ambiente y su capacidad para estimular los mecanismos de defensa de las plantas y mejorar el crecimiento (Saber et al., 2022).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.2 General**

Evaluar el impacto de nanocompuestos a base de Quitosano-Alginato en el crecimiento vegetativo y radicular de plantas de tomate (*Solanum Lycopersicum*) variedad pai pai.

### **1.3 Especifico**

- Determinar el efecto de los nanocompuestos a base de quitosano-alginato en la acumulación de biomasa vegetal.
- Estimar el efecto de los nanocompuestos a base de quitosano-alginato en el desarrollo radicular de las plantas de tomate.

- Determinar la concentración del nanocompuesto que más favorezca al desarrollo vegetativo y radicular de las plantas de tomate.

#### **1.4 HIPOTESIS**

Al menos un tratamiento del nanocompuesto a base de quitosano-alginato tendrá impacto positivo en el desarrollo vegetativo y radicular de las plantas de tomate.

## **II. LITERATURA REVISADA**

### **2.1 Nanotecnología**

La nanotecnología es el uso de la materia en una escala atómica y molecular para propósitos industriales. La manipulación de la materia a escala nanométrica (en un rango de 1 a 100 nanómetros) tiene el potencial de aplicaciones novedosas en muchos campos, que incluyen la genómica, la ingeniería, la ciencia de la computación, la agricultura, la medicina, entre otras (NHGRI, 2024).

#### **2.1.1 Nanotecnología aplicada en la agricultura**

La nanotecnología ha surgido como un avance tecnológico que puede transformar sectores de la agricultura, proporcionando herramientas para la detección rápida de enfermedades en los cultivos, así como mejorar la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes y crecer con mayor velocidad, además de contribuir a reducir la degradación del suelo a través de minimizar el uso de agroquímicos sintéticos nocivos para los agroecosistemas (Lira et al., 2018).

Los nanomateriales desempeñan un papel importante en relación con el destino, la movilidad y la toxicidad de los contaminantes del suelo y son parte esencial de diferentes estrategias de remediación bióticas y abióticas. La eficiencia y el destino de los nanomateriales están fuertemente dictados por sus propiedades e interacciones con los componentes del suelo, lo que también se analiza críticamente (Usman et al., 2020).

Una cualidad importante de los nanomateriales es su dosificación y liberación controlada, lo que le permite aumentar su efectividad, generando alimentos resistentes al ataque de plagas

durante más tiempo en comparación con los cultivos obtenidos por los métodos tradicionales (Marín-Bustamante et al., 2021).

Recientemente se ha implementado el uso de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) para la detección de un amplio espectro de plaguicidas: glifosato y atrazina en agua de riego y lechugas (Sahoo et al., 2018). Dicha tecnología es sobresaliente debido a que además de la detección de los plaguicidas, también tiene la capacidad de degradarlos por la acción fotocatalizadora del ZnO, este mecanismo es una de las herramientas más prometedoras que ofrece la nanotecnología a la agricultura (Marín-Bustamante et al., 2021).

El uso excesivo de agroquímicos sintéticos para incrementar el rendimiento de los cultivos agrícolas conduce al deterioro del suelo, degradación de agroecosistemas, y genera resistencia a los pesticidas por insectos y microorganismos fitopatógenos (Lira et al., 2018).

Los nanomateriales (NM) ofrecen diversos usos en la agricultura, como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanobiosensores y NM para la remediación de suelos a través de vías bióticas y abióticas. El destino de los NM se destaca en el sistema suelo-planta con una evaluación crítica de las amenazas potenciales al ecosistema del suelo contemplando los beneficios que estos pueden aportar (Usman et al., 2020).

Las nanopartículas también son utilizadas para mejorar la eficiencia de los plaguicidas, al aplicar en el campo menores cantidades y hacer más eficiente el manejo agronómico de los cultivos, así como para la transformación genética de plantas (transgénicos), al crear nuevas variedades tolerantes y/o resistentes a factores bióticos y abióticos. (Lira, et al. 2018).

El desarrollo de nuevos nanodispositivos utilizados en la agricultura ha demostrado mejor eficiencia en la producción de alimentos de calidad. El potencial que tiene está para transformar las prácticas agrícolas actuales ayudara potencialmente a disminuir la cantidad de plaguicidas carcinogénicos que llegan al ser humano por consumo de alimentos altamente expuestos a estas sustancias. (Marín-Bustamante et al., 2021). Tal es el caso de los nanosensores, que son herramientas útiles para determinar la presencia de plaguicidas. Vargas-Solano & Zamora-Fernández (2017) diseñaron un nanosensor que detecta la presencia de glifosato en agua para riego, a través del uso de microondas con un límite de detección de  $0.24 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de glifosato.

### 2.1.2 Nanomateriales

(Lizarazo-Salcedo et al., 2018). Reportan que el término nanomaterial se refiere a una sustancia o conjunto de sustancias en la escala de los nanómetros donde los constituyentes son átomos y/o moléculas. Son considerados como materiales naturales que también pueden ser producidos o diseñados de un tamaño aproximado entre 1 y 100 nm, que posee propiedades únicas o composición específica.

### 2.1.3 Características

**Tamaño:** Un nanomaterial pertenece al rango de escala entre 1 y 100 nanómetros (1 nanómetro equivale a  $10^{-9}$  metros).

**Área superficial por volumen específico (VSSA, por sus siglas en inglés):** Un material con VSSA menor a  $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  es definido como nanomaterial.

**Características físico-químicas:** Fase cristalina, ~~crystalinity~~ ~~crystalinity~~ y pequeñas estructuras, potencial redox, fotocatalisis, potencial para la formación de radicales, potencial Zeta, solubilidad en agua, coeficiente de partición-octanol/agua.

**Características orgánicas e inorgánicas:** Los nanomateriales «suaves o blandos» son orgánicos y a menudo son biodegradables y no biopersistentes. Los nanomateriales artificiales, en gran parte inorgánicos e insolubles, se denominan «duros» y no son biodegradables y son potencialmente biopersistentes.

**Persistencia:** Propiedad que da cuenta de la duración o existencia de una sustancia química o material. A este respecto, puede ser considerada como el opuesto de la solubilidad o biodegradación (Lizarazo-Salcedo et al., 2018).

### 2.1.4 Composición

Los nanomateriales se pueden presentar de forma natural, por ejemplo, las cenizas generadas por un volcán, o como subproducto no intencionado de un proceso industrial, por ejemplo, los humos de soldadura o los productos de combustión, denominándose en estos casos nanomateriales incidentales o accidentales, tradicionalmente conocidos como partículas ultrafinas. El término nanomaterial también incluye los nanomateriales manufacturados diseñados intencionadamente con unas propiedades específicas (mecánicas, eléctricas,

ópticas, catalíticas, etc.) muy diferentes, en muchos casos, a las que presenta el mismo material a tamaño nano (INSHT, 2015).

Los nanomateriales tienen composiciones químicas únicas, como lo son los puntos cuánticos de selenio de cadmio (CdSe), los silicatos tratados con organosilano y acrilato, nanotubos de carbono funcionalizados con diferentes tipos de compuestos, nano-resortes de sílice, entre otros. (Lizarazo-Salcedo et al., 2018).

También se encuentran los nanomateriales inorgánicos no metálicos (Este grupo incluye un amplio número de nanomateriales que principalmente son óxidos de elementos no metálicos. Los nanomateriales inorgánicos no metálicos de mayor producción son: la sílice amorfa sintética con propiedades antideslizantes y gran resistencia al rayado y a la abrasión al igual que el óxido de aluminio que también presenta gran resistencia al rayado y a la abrasión (INSHT, 2015).

#### **2.1.5 Modo de acción**

Los estudios muestran que el uso de nano fertilizantes incrementa la eficiencia de los nutrientes, reduce la toxicidad del suelo, minimiza los riesgos de contaminación de suelos y aguas por la sobredosificación y disminuye la frecuencia en la aplicación de fertilizantes (Usman et al., 2020).

Un nano-fertilizante es un producto que libera nutrientes a los cultivos en alguna de estas formas: se encapsula dentro de nanotubos o materiales nanoporosos, es cubierto por una fina película polimérica o como partículas o emulsiones de escala nanométrica (INTAGRI, 2015).

La creación de nanocompuestos de silicato en capas de quitosano mediante la incorporación de cadenas de quitosano en capas intermedias de silicato puede mejorar sus propiedades mecánicas. Según la literatura disponible, falta información sobre el efecto sinérgico de los nanocompuestos de quitosano/sílice (Youssef, et al., 2019).

Se ha demostrado que al aplicar los nanofertilizantes en cantidades muy pequeñas, minimizan el efecto negativo de las sobredosis, bajan la frecuencia de aplicación de los fertilizantes y



en consecuencia el costo de estos importantes insumos generando así una mayor rentabilidad (Lira et al., 2018).

### **2.1.6 Mecanismo de acción**

Considerando el tamaño de las rutas de acceso y absorción nutrimental de la planta (simplasto, apoplasto y vía foliar), se pueden suponer algunas ventajas de aplicar nanofertilizantes, los cuales podrán acceder fácilmente a la planta. Actualmente ya se han diseñado NP como un componente de los fertilizantes destinados a aumentar la eficiencia en su uso, haciéndolos del mismo tamaño que los poros de la raíz y las hojas. Recientemente se demostró que nanotubos de carbono pudieron penetrar semillas de tomate, también se demostró que NP de óxido de zinc penetraron en el tejido radical de un pasto. Esto sugiere que se puede aprovechar la nanotecnología para mejorar la nutrición vegetal. Considerando la alta superficie de contacto en relación con el volumen ocupado, la efectividad de los nanofertilizantes sobrepasa a los más novedosos fertilizantes recubiertos convencionales, en los cuales se ha visto poca mejora en los últimos diez años. (INTAGRI, 2015).

Goy et al. sugirió tres mecanismos de acción antibacterianos del quitosano; en primer lugar, la interacción de la superficie iónica que produce fugas en la pared celular; en segundo lugar, la penetración de quitosano en los núcleos de los microorganismos inhibe su síntesis de proteínas y ARNm y, en tercer lugar, la formación de una película externa sobre la superficie de la planta, lo que limita la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos Liang et al; (Sharif, et al., 2018).

(Kundu et al., 2021). Sostiene que los productos nanohabilitados han ganado popularidad sobre los convencionales debido a su mayor eficacia en la liberación lenta/ controlada de insumos agrícolas, dosis más pequeñas, menos materiales de relleno, productos con bajo desperdicio, etc. Los nanocompuestos son una clase especial de materiales sólidos heterogéneos. Estos tienen una fase de matriz continua y una fase reforzada discontinua que tiene al menos una dimensión hasta 100 nm (Kundu et al., 2021).

## 2.2 Quitosano

El biopolímero de quitosano (CHT) es un derivado de quitina desacetilado que existe en la capa exterior de camarones, mariscos, langostas o cangrejos, así como en las paredes celulares de los hongos. Debido a su biodegradabilidad, no toxicidad ambiental y biocompatibilidad, es un recurso ideal para la agricultura sostenible (Chakraborty et al., 2020).

El quitosano es la forma deacetilada del biopolímero de quitina, producido natural o industrialmente. El efecto fisiológico de los oligómeros de quitosano en plantas son el resultado de la capacidad de este compuesto policatiónico de unirse a una amplia variedad de compuestos celulares, incluyendo DNA y constituyentes de la membrana plasmática y de la pared celular. Además, son capaces de unirse a receptores específicos responsables de la activación de las defensas de las plantas, de forma similar a los elicitores de las plantas (INTAGRI, 2020).

Las nanopartículas de quitosano muestran una mayor eficacia antifúngica y antibacteriana que las soluciones crudas de quitosano. Recientemente se han utilizado polímeros y nanopartículas a base de quitosano para frutas y recubrimientos, para prolongar la vida útil y mantener la calidad de la fruta de plátano. (Youssef et al., 2019).

Los nanocompuestos de plata y quitosano se planearon como agentes fungicidas capaces de prevenir el moho gris de la fresa. Actualmente se utilizan nanopartículas a base de quitosano complejadas con metales contra diferentes hongos patógenos de plantas, incluidos *Phytophthora capsici*, *Corynespora cassiicola*, *Fusarium oxysporum*, *Pyricularia grisea* y *Rhizoctonia solani*. (Youssef et al., 2019).

El quitosano es un biopolímero que se ha utilizado para la síntesis de nanopartículas de pendimetalina cobre-quitosano utilizando el quitosano como estabilizador y agente de protección como formulación herbicida de liberación controlada (Kundu et al., 2021).

El quitosano se considera un agente prometedor promotor del crecimiento de las plantas y también como agente antimicrobiano. Este induce el crecimiento de las plantas al influir en

los procesos fisiológicos estas, como la absorción de nutrientes, la división celular, el alargamiento celular, la activación enzimática y la síntesis de proteínas, que eventualmente pueden conducir a un mayor rendimiento. También actúa como catalizador para inhibir el crecimiento de patógenos vegetales y alterar las respuestas de defensa de las plantas al desencadenar múltiples vías metabólicas útiles. (Chakraborty et al., 2020).

La quitina es un biopolímero muy abundante que se puede encontrar en el exoesqueleto de crustáceos, cutículas de insectos, algas y en la pared celular de hongos. El quitosano es menos frecuente en la naturaleza presentándose en algunos hongos. Históricamente, las muestras comerciales de quitosano se producían principalmente a partir de la desacetilación química de la quitina procedente de crustáceos. Más recientemente, el quitosano procedente de hongos está ganando interés en el mercado, impulsado por las demandas veganas. (Aranaz et al., 2021).

### **2.2.1**

#### **Características**

El quitosano es soluble en medios ácidos acuosos. Por el contrario, en la quitina, el número de residuos acetilados es lo suficientemente alto como para evitar que el polímero se disuelva en medios ácidos acuosos. La característica más destacada de estos bionanocompuestos a base de quitosano es su biocompatibilidad, lo que favorece su aplicación en medicina, envasado de alimentos y depuración de aguas residuales. Esta propiedad se ejerce entre los grupos amonio del quitosano con carga positiva ( $-NH_3^+$ ) y los grupos con carga negativa estableciendo enlaces de hidrógeno con atracción electrostática. (Azmana et al., 2021).

La quitina, el quitosano, los oligosacáridos y sus derivados ejercen muchas actividades biológicas, incluidas actividades antitumorales, antimicrobianas, antioxidantes y antiinflamatorias, que podrían usarse como polímeros terapéuticos (Aranaz et al., 2021).

El quitosano no representa peligro alguno ya que no es tóxico para el ser humano, la importancia de los bionanocompuestos a base de quitosano está aumentando excesivamente debido a sus aspectos beneficiosos. Sin embargo, en algunos casos, presenta desafíos que

deben resolverse, ya que actualmente no existen reportes en la literatura que aseguren sus beneficios. (Azmana et al., 2021).

El quitosano, sus derivados y los quitooligosacáridos ejercen actividad antimicrobiana contra diferentes microorganismos, incluidas bacterias, hongos filamentosos y levaduras. El quitosano parece tener una actividad inhibidora del crecimiento ya que las bacterias pueden crecer después de que se retira el polímero del medio. Esto es importante ya que podrían surgir poblaciones resistentes si las células se adaptan al quitosano. (Aranaz et al., 2021).

Debido a la escasa solubilidad del quitosano por encima de pH 6,5, se está considerando el uso de quitooligosacáridos como biosidas policatiónico, ya que son solubles en agua (Aranaz et al., 2021).

### **2.2.2 Funciones como estimulante vegetal**

El quitosano se ha utilizado como bioestimulante para estimular el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés abiótico, y como inductor de resistencia a patógenos; sin embargo, estas respuestas son complejas y dependen de diferentes estructuras y concentraciones de quitosano, así como de la especie de planta y la etapa de desarrollo (Pichyangkura, & Chadchawan, 2015).

Muchos estudios han demostrado que la aplicación foliar de quitosano mejora el crecimiento y el rendimiento de las plantas e induce la síntesis de metabolitos secundarios como polifenoles, flavonoides, lignina y fitoalexinas en las plantas, además de que influye en la permeabilidad de la membrana plasmática de las semillas, mejora la concentración de azúcar y prolina, aumenta las actividades de peroxidasa (POD), fenilalanina amonialiasa (PAL), tirosina amonialiasa (TAL) y catalasa (CAT) (Chakraborty et al., 2020).

Con respecto a la agricultura, la aplicación del quitosano se ha estudiado en muchas especies de cultivos, incluidos cereales, ornamentales, frutales y medicinales. Afecta diversas respuestas en las plantas dependiendo de la estructura y concentración de las moléculas de quitosano (Kananont et al., 2010, Limpanavech et al., 2008, Lin et al., 2005), especies de

plantas (Ohta et al., 2004) y su etapa de desarrollo (Pornpienpakdee et al., 2010; (Pichyangkura, y Chadchawan, 2015).

Se ha demostrado que la aplicación de quitosano regula varios genes en las plantas, en particular la activación de las vías de señalización de defensa de las plantas. Eso incluye la obtención de fitoalexinas y proteínas. Además, el quitosano se ha empleado en el suelo como nutriente para las plantas y ha demostrado una gran eficacia en combinación con otros fertilizantes industriales sin afectar los microbios beneficiosos del suelo, asimismo es útil para reducir las pérdidas de fertilizantes debido a su capacidad de recubrimiento, lo cual es importante para mantener bajo control la contaminación ambiental (Sharif et al., 2018). El quitosano se ha estudiado ampliamente como un medio para inhibir el crecimiento microbiano y disminuir la integridad de la membrana microbiana (Xu et al., 2007a, Palma-Guerrero et al., 2008), reduciendo la incidencia y gravedad de enfermedades en muchos cultivos (Abd-Alla y Haggag, 2010; Ali et al., 2010; Ali et al., 2012; Ali et al., 2013; Ali et al., 2014; Ali et al., 2015; (Pichyangkura, y Chadchawan, 2015).

La efectividad de las interacciones del quitosano está determinada por su origen, grado de desacetilación y patrón de acetilación, peso molecular, tipo de modificaciones químicas, pH, concentración y solubilidad. Se ha informado que el quitosano tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de las rizobacterias, donde el quitosano posee una relación simbiótica con las rizobacterias promotoras del crecimiento, lo que desencadena la tasa de germinación y mejora la absorción de nutrientes de las plantas (Sharif et al., 2018).

Las plantas de tomate se sometieron a un tratamiento con quitosano, lo que resultó en una alta actividad de compuestos fenólicos y PPO, producción de fitoalexinas y una mejora en el peso de la fruta y el rendimiento general. El quitosano se puede utilizar para retrasar la maduración y mejorar la vida útil de los plátanos (Sharif et al., 2018).

El quitosano ha demostrado gran importancia en la mejora de los mecanismos fisiológicos y la vida útil poscosecha de frutas y verduras frente al estrés biótico y abiótico. Además, los derivados del quitosano poseen una buena actividad insecticida; sin embargo, hasta donde sabemos, no existe ningún informe sobre el uso del quitosano en un estudio de campo contra insectos en los principales cultivos hortícolas (Sharif et al., 2018).

## **2.3 Alginato**

La especie de alga parda *Sargassum*, es utilizada como fuente comercial de alginato, ampliamente investigado por sus diversas aplicaciones en las industrias farmacéutica, alimenticia, química, textil, cosmética, biotecnológica, y agrícola, debido a sus propiedades espesantes, gelificantes, estabilizantes, así como su baja toxicidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad y relativo bajo costo (Gómez-Matos et al., 2023).

Actualmente los alginatos comerciales se extraen de algas marinas como *Laminaria* y *Macrocystis*. También se puede obtener de fuentes bacterianas, concretamente *A. vinelandii* y varias especies de *Pseudomonas* como *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas mendocina* (Xing et al., 2020).

En las algas pardas, el alginato se encuentra en forma de sales monovalentes (sodio y potasio) y divalentes (calcio, magnesio, estroncio y bario). El procedimiento de extracción es otro de los factores determinantes en las características estructurales del alginato que se aísla. Esto demuestra la importancia de la metodología de obtención de este polímero, ya que las características estructurales determinarán sus propiedades físico-químicas y mecánicas, y en consecuencia su aplicación (Gómez-Matos et al., 2023).

### **2.3.1 Características**

El alginato de sodio tiene carga negativa debido a la presencia de grupos carboxilo de los residuos de ácido urónico. Generalmente, el alginato de sodio produce hidrogeles rígidos, pero relativamente porosos, con propiedades físicas y mecánicas débiles, que son importantes para la administración de agentes activos (Juric et al., 2021).

Los alginatos presentes en los extractos de algas mejoran la calidad y la estructura del suelo al aumentar la retención de agua, la circularidad del aire y promover la actividad microbiana (Deolu-Ajayi et al., 2022).

Juric et al., (2021) reportaron que los tratamientos con micropartículas a base de alginato en lechuga (*Lactuca sativa* L.) estimularon significativamente la síntesis de metabolitos de las plantas, sin un impacto significativo en la morfología de la lechuga. Se logró una liberación controlada y la absorción pasiva de iones a través del sistema radicular estuvo activa durante todo el período de maduración.

### **2.3.2 Funciones como estimulante vegetal**

La potencial aplicación de alginato como material super absorbente para mantener la humedad del suelo por largos periodos de tiempo, se ha quedado a nivel académico. No se conocen resultados recientes relacionados con investigaciones acerca de la aplicación de alginato en el suelo. La mayor aplicabilidad del alginato es su uso como matriz para sistemas de liberación controlada (Gómez-Matos et al., 2023).

Los oligosacáridos de fucoïdan funcionan como inductores de la respuesta de defensa local y como agentes cebadores en la defensa sistémica de las plantas (Klarzynski et al., 2003). Los alginatos derivados de algas y sus oligoderivados actúan en la estimulación del crecimiento, el desarrollo y la resistencia de las plantas (Mukherjee & Patel, 2020 ; Shukla et al., 2019; (Deolu-Ajayi et al., 2022).

Para la encapsulación de ingredientes químicos y biológicos es frecuente la preparación de nano, micro y macrocápsulas de alginato. Por ejemplo, se destaca la encapsulación de urea, fertilizante nitrogenado muy usado, que la planta no aprovecha en su totalidad, ya que se pierde por volatilización. También se han encapsulado microorganismos promotores del crecimiento vegetal o los empleados como biocontroladores de plagas y enfermedades. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se enfocan en la optimización de las metodologías de encapsulación, y no en su aplicación (Gómez-Matos et al., 2023).

Se ha demostrado que los compuestos presentes en las algas marinas tienen efectos positivos no sólo en el crecimiento y la resiliencia de las plantas sino también en la salud del suelo. Por ejemplo, se ha informado que los alginatos solubles de algas e hidrolizados de proteínas facilitan la agregación de partículas del suelo, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes,

la aireación y la capacidad de retención de agua en el suelo (Colla et al., 2017 ; Khan et al., 2009; (Deolu-Ajayi et al., 2022).

## **2.4 JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)**

### **2.4.1 Antecedentes del cultivo**

El jitomate fue domesticado por los pueblos mesoamericanos hace 2,600 años, gracias a eso en México gozamos de una enorme variedad tanto de tamaño como de colores y por supuesto de sabores, algunos ejemplos son: redondo (bola), saladette o guajillo, pera, cereza o cherry, además por su calidad nos posiciona como líderes mundiales en exportación (SADER, 2022). Se sabe que el grupo *Solanum* se originó en el sur de América, en la vertiente oeste de la cordillera de los Andes en países como Ecuador y Perú; sin embargo, se cree que el proceso de domesticación fue en Mesoamérica, específicamente en nuestro país (INECOL, 2020). En el 2022, México se ubicó en el octavo lugar en el ranking mundial de productores de tomate con un volumen de producción de 3,461,766, los principales estados productores de esta hortaliza fueron San Luis Potosí, Sinaloa y Michoacán (SIAP-SADER, 2023).

### **2.4.2 Manejo del cultivo**

Cuando la producción se lleva a cabo bajo invernadero, es importante hacer la desinfección de instalaciones, herramientas, y utensilios previos al establecimiento del cultivo, para prevenir la presencia de enfermedades. Para este proceso, se pueden utilizar sales cuaternarias de amonio, hipoclorito de sodio y monopersulfato potásico. Posteriormente se lleva a cabo la preparación del sustrato ya sea en camas de siembra, contenedores o macetas. Durante este periodo de acondicionamiento de las instalaciones se siembran las semillas en charolas para la producción de las plántulas. El trasplante se lleva a cabo a los 30 días posteriores a la siembra o cuando la plántula ha alcanzado 3 o 4 hojas verdaderas y una altura de 10 a 12 cm. Previo al trasplante se debe hidratar el sustrato a capacidad de campo. Posteriormente se abre los espacios, se depositan y se fijan las plantas, buscando un buen contacto entre el suelo o sustrato y el cepellón de la plántula. Para asegurar este contacto se recomienda realizar un nuevo riego, incluso puede ayudar que se aplique vía riego un enraizador o fungicida. (INTAGRI, 2018).



Los riegos son recomendables en las primeras horas del día. Entutorado o guiado de las plantas puede hacer del tipo holandés en el invernadero o en espaldera (usualmente a campo abierto, normalmente se entutora cada semana). Se hace con el objetivo que el crecimiento de las plantas sea de manera vertical y ayude a sostener el peso de los frutos. Cuando las plantas alcanzan 2 o 2.5 m las plantas son descolgadas progresivamente; este descuelgue consiste en desenrollar la rafia 1 o 2 vueltas. Poda. Es una práctica referida a la remoción de brotes y hojas en el momento adecuado que permita el desarrollo adecuado del cultivo. Al momento de comenzar las podas es importante seleccionar el número de tallos que se conducirán por planta y a partir de ahí eliminar los brotes axilares. También es necesario remover las hojas senescentes gradualmente. La poda se puede hacer con tijeras previamente desinfectadas o de manera manual sujetando la base del brote y dando un tirón hacia arriba. (INTAGRI, 2018.)

Aclareo de frutos en este es necesario despuntar las inflorescencias con un gran número de flores para que los frutos puedan desarrollarse adecuadamente o se evite el desprendimiento de los mismos al desarrollarse. La poda de frutos se realiza poco después de su cuaje, procurando eliminar aquellos malformados, con retraso significativo con el resto o que tuvieron problemas de polinización. En variedades para racimo suelen dejarse de 5 a 6 frutos por racimo (INTAGRI, 2018).

### **2.4.3 Requerimientos edafoclimáticos**

Al igual que muchos cultivos requiere un suelo bien drenado con un porcentaje de materia orgánica elevado, procurando tener una profundidad en el perfil de suelo entre 40 a 60 cm para el desarrollo del sistema radical. Asimismo, debe contar con un pH entre 6 a 6.5 para que estén disponibles los nutrientes que contiene el suelo. El consumo diario de agua por metro cuadrado cuando el tomate está establecido en suelo oscila entre 2 a 3 litros, mientras que en sustrato esta entre 2 y 4 litros (más 30 %, que corresponde al drenaje) y reproducción total o parcial (INTAGRI, 2018.)

Para el desarrollo apropiado del cultivo la humedad relativa debe oscilar entre un 60 a 80 %, donde humedades excesivas propician el desarrollo de enfermedades fungosas y bacterianas, además de que obstaculizan la fecundación de las flores. También la humedad relativa está asociada con el rajado de fruto (INTAGRI, 2018).

Por otro lado, la temperatura regula cada uno de los procesos fisiológicos de la planta, por lo que debe atenderse en cada etapa fenológica del cultivo (INTAGRI, 2018.), el rango de temperatura en cada una de las etapas fenológicas del cultivo se presenta en el Cuadro 1, extraído de Camacho (2015).

**Tabla 1.** Temperaturas críticas para el cultivo de tomate

<b>Fuente: Camacho, 2015.</b>		
Se hiela la planta		2 °C
Detiene su desarrollo		10-15 °C
Mayor desarrollo		20-24 °C
Germinación mínima		10 °C
Germinación óptima		25- 30 °C
Germinación máxima		35 °C
Nacencia		18 °C
Primeras hojas		12 °C
Desarrollo	Diurna	18-21 °C
	Nocturna	15-18 °C
Floración	Diurna	23-26 °C
	Nocturna	15-18 °C
Maduración		15-22 °C
Suelo	Mínima	12 °C
	Óptima	20-24 °C
	Máxima	34 °C

## **2.5 Importancia nacional e internacional**

### **2.5.1 Nacional**

El jitomate es uno de los cultivos más importantes de México y del mundo, tanto por su importancia económica como por ser fuente de vitaminas, minerales y antioxidantes, Los minerales que contiene son calcio, fósforo, potasio y sodio y las vitaminas que contiene son A, B1, B2, y C. Además, tiene propiedades medicinales entre las que destacan las siguientes:

antiséptico, alcalinizante, depurativo, diurético, digestivo, laxante, desinflamatorio y remineralizante (SADER, 2022).

México es el principal proveedor a nivel mundial de jitomate con una participación en el mercado internacional de 25.1 1% del valor de las exportaciones mundiales. A pesar de que durante el periodo 2003-2016 se experimentó una reducción en la superficie sembrada, presentó un crecimiento acumulado en la producción (54,25%) y en las exportaciones en fresco (77.87%), convirtiéndolo en uno de los cultivos con mayor incremento en productividad (SADER, 2017).

### **2.5.2 Internacional**

El tomate es una de las tres principales hortalizas cultivadas en el mundo, donde China es el principal productor con 52, 586, 860 toneladas (SIAP, 2017). EE. UU., es el principal importador de tomate y México es el principal exportador de esta hortaliza, destinando 99.7 % de sus exportaciones al mercado estadounidense (INTAGRI, 2018.)

### **2.5.3 Aportes nutrimentales**

El jitomate es un alimento poco energético, dos tomates medianos aportan tan sólo 22 calorías. Aproximadamente 95% de su peso es agua, cerca de un 4% son hidratos de carbono. De su contenido en vitaminas destacan la B1, B2, B5, vitamina C y carotenoides como el licopeno (pigmento que da el color rojo característico al tomate). Estas dos últimas sustancias tienen carácter antioxidante con función protectora del organismo. Durante los meses de verano, el tomate es una de las fuentes principales de vitamina C (PROFECO, 2020).

De igual forma se le atribuyen ciertas propiedades medicinales como: antiséptico, alcalinizante, depurativo, diurético, digestivo, laxante, desinflamatorio y remineralizante (PROFECO, 2020).

### **2.5.4 Producción en México**

En 2019, el estado de Sinaloa fue el principal productor de jitomate con 22.2% de la producción nacional total, seguido por San Luis Potosí, Michoacán, Zacatecas y Jalisco (PROFECO, 2020).

En el avance al mes de octubre del ciclo agrícola primavera-Verano (PV) 2022, se sembraron de tomate rojo (jitomate) 25,424 hectáreas (ha), 4.0% (970 ha) más a lo reportado en el mismo ciclo de 2021 (24,454), de las cuales, se han cosechado 18,209, 7.3% (1,238 ha) (SIAP, 2022).



**Figura 1.** Contribución porcentual de jitomate, 2019

En el contexto productivo, de las 51,861 hectáreas sembradas en 2016, el 95.70% de la superficie se encuentra mecanizada, 73.26% cuenta con tecnología aplicada a la sanidad vegetal, mientras que 76.62% del territorio sembrado con este cultivo contó con asistencia técnica. Por otro lado, 3.57% de la producción se realizó en modo de riego por bombeo, 0.04% se realizó por gravedad 0.93% fue en modalidad de riego por goteo 3.82% fue de temporal y el resto en algún otro tipo de riego sin especificar (SADER, 2017).

Actualmente se satisface 100% de los requerimientos nacionales con producción interna; asimismo, las importaciones mundiales han aumentado 39.41% en la última década, lo que ha generado un incremento en las exportaciones mexicanas principalmente con destino a Estados Unidos (SADER, 2017).

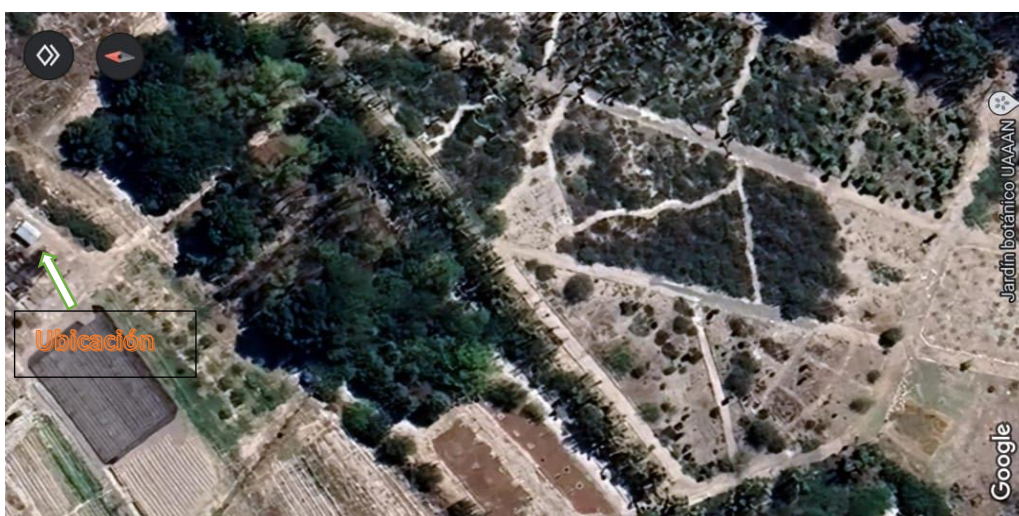
### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1.1 Ubicación del experimento

Este experimento se llevó a cabo en un invernadero ubicado en el Área de Agricultura del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

#### 3.1.2 Coordenadas geográficas

El sitio donde se realizó el trabajo experimental tiene las siguientes coordenadas 25°21'27.1"N latitud y 101°02'00.3"W longitud.



**Figura 2.** Ubicación geográfica del invernadero usado para el experimento.

#### 3.1.3 Material vegetativo utilizado

Se utilizó semillas de tomate rojo o jitomate (*Solanum lycopersicum*) de la variedad pai pai las cuales fueron inoculadas por un día con el Nanocompuesto de Quitosano-Alginato para posteriormente colocarlas en una charola germinativa de 200 cavidades.

### **3.1.4 Establecimiento del cultivo**

Antes de iniciar el experimento se adecuó un espacio dentro del invernadero donde pudiese estar la charola germinativa para que las semillas tuvieran óptimas condiciones para su germinación y posteriormente su desarrollo de las plántulas.

### **3.1.5 Establecimiento del experimento**

El experimento se estableció con un diseño en bloques completamente al azar, teniendo 4 tratamientos y un testigo (T1), con 8 repeticiones por tratamiento. Los tratamientos fueron etiquetados con base a la concentración del nanocompuesto de (quitosano-alginato) aplicada (100 – 250 – 500 y 1000 ppm) de cada uno. Los tratamientos se aplicaron directamente al sustrato a los 7 días después del trasplante posteriormente cada 5 días.

### **3.1.6 Trasplante**

Posteriormente a los 30 días de su germinación se trasladaron a vasos de unicel de (450 ml), humedeciendo el sustrato para evitar el estrés en las plántulas, después a los 27 días se cambiaron a recipientes con mayor capacidad (1L) para mayor retención de humedad y al mismo tiempo se implementaron unas estacas de madera a manera de guía. El sustrato utilizado fue perlita y peat moss en proporción 1:1.

### **3.1.7 Aplicación de tratamientos**

Para la aplicación correcta de los tratamientos de cada nanocompuesto las cuales fueron a 100 – 250 – 500 y 1000 ppm se tomaron con ayuda de micro pipetas para una correcta medición, diluidas en 500 ml de agua destilada, y estos con ayuda de una jeringa para aplicarlos directamente al sustrato identificando los tratamientos con el etiquetado que se colocó en el establecimiento del experimento.

### **3.1.8 Control de plagas y enfermedades**

Durante el proceso que duró el experimento se presentó el pulgón verde (*Myzus persica*) y para su control se aplicó Actram (Tiametoxam) insecticida sistémico en proporción 0.3 g L<sup>-1</sup>.

### **3.1.9 Síntesis de Materiales**

Existen diferentes métodos de preparación de nanopartículas y la selección depende de los objetivos y condiciones particulares que se requieran para buscar la aplicación de las nanopartículas obtenidas. Para llevar a cabo una reacción de síntesis, es necesario que se cumplan ciertos parámetros, dependiendo de cada reacción como son temperatura, presión, concentración de reactivos, velocidad de agitación, tiempo, velocidad de agregación de dosis, entre otros. Algunos métodos de síntesis de nanomateriales son: el método coloidal en la que las partículas coloidales se juntan y forman aglomeraciones cada vez más grandes, cuando son muy grandes por acción de la gravedad se precipitan y forman nanopartículas, reducción fotoquímica para la obtención de nanopartículas metálicas por medio de altas energías electromagnéticas, síntesis con microondas donde la síntesis se asiste con ondas método sol-gel en forma húmeda que se parte de una solución química llamada sol que forma una red integrada de nanopartículas llamada gel, y la técnica de gelación iónica.

#### **3.1.10 Gelación Iónica**

La gelación iónica es una técnica de encapsulación que da como resultado cápsulas con un diámetro menor de 1000 nanómetros. Para llevar a cabo la gelación son necesarios materiales de recubrimiento, los cuales pueden ser gomas, carbohidratos, celulosas, lípidos, proteínas y materiales inorgánicos, y una solución reticulante, que, por lo general, son iones calcio (cloruro de calcio). La gelación iónica consiste en producir pequeñas gotas de solución a partir de la mezcla del material de recubrimiento y el compuesto que se desea encapsular.

#### **3.1.11 Síntesis de nanopartículas de quitosano con alginato**

Para la síntesis de las NpQs-ALG-TPP primeramente se prepararon diferentes soluciones de cada uno de los componentes del sistema. Se preparó una solución de quitosano al 1% (v/v), en un matraz de aforación de 250 mL se adicionaron 2.5 g de quitosano y 170 mL de ácido acético. Esta solución se dejó en agitación durante 54 h hasta obtener una solución homogénea, enseguida se aforó la solución con ácido acético y se dejó en disolución alrededor de 4 h. Por otra parte, se prepararon soluciones de TPP y ALG utilizando agua Milli-Q, Las soluciones de TPP fueron preparadas a diferentes concentraciones. En un vial se adicionaron 9 mg de TPP en 6 mL de agua Milli-Q, para obtener una concentración 1.5 mg/mL. Por otra parte, se preparó de igual manera la solución de alginato de sodio a la que



se agregaron 9 mg del alginato en 6 mL de agua Mili-Q para obtener una concentración de 2 mg/mL.

### **3.1.12 Síntesis de nanopartículas de quitosano modificadas con alginato de sodio utilizando TPP como agente entrecruzante.**

En un matraz bola de 50 mL se agregaron 18 mL de la solución de quitosano al 1 %. El matraz fue expuesto a agitación de 700 rpm a temperatura ambiente. A esta solución se adicionó gota a gota la solución de ALG. Al momento de adicionar la solución se observaron pequeños aglomerados. Una vez que se agregó toda la solución de ALG y manteniendo la agitación constante, se procedió a agregar el agente entrecruzante de igual manera que la solución del ALG, gota a gota. Se adicionaron (solución TPP) 6 mL la muestra resultante se mantuvo en agitación durante 30 minutos hasta terminar el tiempo de la reacción de gelación iónica. La muestra resultante se pasó a viales de 50 mL para su centrifugación a 1000 rpm durante 30 min. Una vez centrifugado el material obtenido se decantó y se dejó el sobrenadante al que se adicionó agua para sus posteriores lavados. Este proceso se realizó 4 veces por cada muestra obtenida, las cuales fueron posteriormente caracterizadas por diferentes técnicas.

### **3.1.13 Caracterización**

#### **3.1.14 Dispersión de Luz Dinámica (DLS)**

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un dispersor de luz Microtrac Nanotracs Wave II. En el cual fue necesario mantener las muestras en estado líquido, dicho análisis consta de someter una cantidad pequeña del hidrogel en el equipo, para ser analizado, no fue necesario realizar ningún tipo de preparación previa de la muestra, ni montarla en ninguna estructura. Sin embargo, se debe revisar que el equipo se encuentre limpio y bien calibrado con los parámetros de la muestra a analizar, en este caso los parámetros del quitosano. el porta muestras, siempre debe contener líquido, ya sea la muestra o agua, para poder correrse correctamente. Otro de los datos importantes, es asegurarse de que el porta muestras se encuentre totalmente limpio, para esto, se realiza el análisis denominado rinse celd por tres ocasiones. Seguido de esto, se puede continuar con el análisis o realizar limpieza del porta muestras. Se lleva a cabo el corrimiento de las muestras por tres ocasiones durante 60 segundos cada una y se obtienen los resultados, por un promedio, en esta ocasión tomaremos en cuenta los resultados de volumen de población y el diámetro de las nanopartículas.

#### **3.1.15 Espectroscopia de infrarrojo (FTIR)**

Para llevar a cabo este análisis se utilizó un espectroscopio infrarrojo Thermo scientific nicolet is50. Dicho análisis requirió de una preparación previa de la muestra, en este caso se obtuvo un hidrogel, el cuál fue congelado, durante 24 horas y posteriormente llevado a liofilizar, proceso que consta de

secar la muestra a baja temperatura (-40°C) y a presiones muy bajas durante 48 horas, dicha presión, tiene el objetivo de generar un vacío y absorber por completo el agua presente en la muestra en forma de sublimación. Proceso del cual se obtiene un xerogel, que nos permitirá realizar la espectroscopia, así como los análisis posteriores. La espectroscopia se realiza aplicando una pequeña parte de la muestra en el porta muestras y asegurándose de cerrarle correctamente, posterior a esto, el equipo enviará las señales de IR a una computadora, donde se verá reflejado el espectro, una vez realizado el corrimiento de la muestra, se procede a ajustar el espectro, para facilitar su entendimiento, seguido de esto, se realiza la gráfica por medio del programa Origin, para ser comunicada. También fue necesario realizar un blanco de espectros de cada sustancia utilizada, para facilitar la comparación realizada y observar de forma gráfica, la modificación de las nanopartículas de quitosano, por las soluciones, unificadas como nano cápsulas.

### **3.1.16 Microscopía electrónica de barrido**

Para este proyecto dicho análisis se utilizó, con la finalidad de conocer la morfología de la muestra, el análisis se realizó en un microscopio electrónico de barrido JEOL JCM-6000, que permitió realizar distintas capturas de la muestra, hasta 25,000 nm. En este caso, se montó la muestra en una pastilla de aluminio, como la muestra no presenta propiedades conductoras, se realizó un recubrimiento de una capa fina con oro, por la técnica de sputtering la cual consiste en provocar la colisión de iones en vacío y un entorno de plasma, sometido a un fuerte campo magnético con la finalidad de extraer átomos de oro y generar gradualmente una película delgada sobre una pequeña cantidad de la muestra, para que al momento de realizar el barrido de electrones, este sea capaz de proyectar la imagen de forma nítida.

## **3.2 Variables evaluadas**

### **3.2.1 Actividad fotosintética (SPAD)**

Para tomar esta variable se utilizó un medidor de clorofilas (SPAD) tomándose de hojas y plantas totalmente al azar (una vez durante todo el experimento).

### **3.2.2 Altura (cm)**

Esta variable se tomó con la ayuda de una cinta métrica o flexómetro empezando desde la parte más baja del tallo de la planta hasta los meristemos apicales de la misma (una vez por semana).

### **3.2.3 Grosor de tallo (mm)**

Esta variable se tomó con la ayuda de un vernier electrónico tomando el diámetro de la parte basal del tallo de todas las plantas (una vez por semana).

### **3.2.4 Peso fresco foliar (g)**

En esta variable se realizó mediante la ayuda de una báscula digital, se cortó el tallo en la parte basal y se procedió a fraccionarlo junto con las hojas de la planta para poder obtener su peso de manera exacta posteriormente almacenarla en bolsas de papel previamente etiquetadas de la misma forma que la distribución de los tratamientos para su registro correcto.

### **3.2.5 Peso fresco raíz (g)**

Una vez teniendo la raíz separada del tallo, se realizó un lavado de raíz el cual consiste en dejar limpia la raíz sin residuos de sustrato para posteriormente pesarla en una balanza digital y posteriormente guardarla en bolsas de papel ya etiquetadas con forme a los tratamientos.

### **3.2.6 Volumen de raíz (ml)**

Esta variable se tomó teniendo la raíz ya lavada, con ayuda de agua y una probeta graduada se aforaba la probeta con agua hasta un punto ya determinado y cuando se introducía la raíz la diferencia era el volumen de la raíz.

### **3.2.7 Longitud de raíz (cm)**

Teniendo la raíz lavada y separada del tallo se colocará en una superficie plana y se tensará lo mayormente posible cuidando el no romperla para posteriormente medirla con ayuda de una cinta métrica o un flexómetro.

### **3.2.8 Peso seco raíz (g)**

Para la obtención de esta variable se sometió la raíz a un horno de secado durante 24 horas para que pudiera drenar toda el agua que esta aun pudiera conservar para después poder pesar

esta variable de la mejor manera se pesó en una báscula analítica asegurándose que no queden residuos de raíz dentro de las bolsas de papel.

### 3.2.9 Peso seco foliar (g)

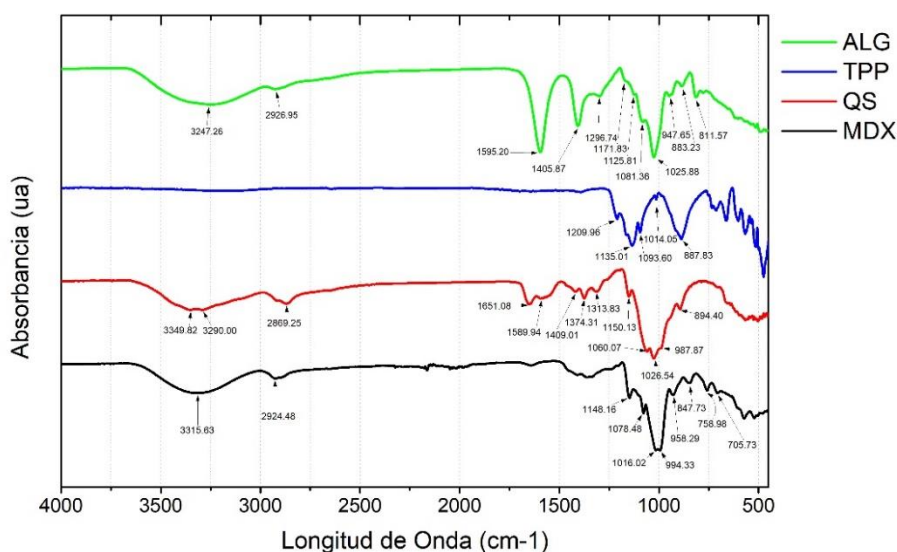
Las muestras recolectadas se sometieron a un horno de secado por 48 horas para asegurar que se drenara toda el agua que esta contenía y asegurar un secado correcto para posteriormente pesarla en una báscula analítica y realizar una toma de datos correcta.

### 3.3 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se realizó con un análisis (ANOVA) y para la comparación de medias se utilizó la prueba de LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ) mediante el paquete estadístico Infostat 2020.

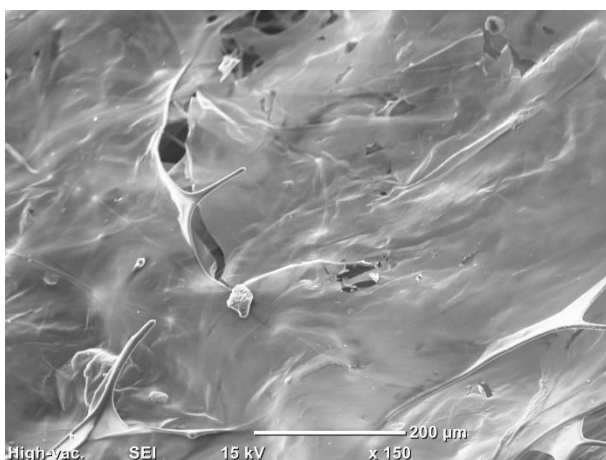
## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3 se pueden observar los espectros de infrarrojo (FTIR) del quitosano, tripolisfotato de sodio pentabásico, la maltodextrina y el alginato de sodio que se utilizaron para la preparación de las muestras de quitosano, TPP y alginato de sodio y de las muestras de quitosano, TPP y MDX.



**Figura 3:** Espectro IR de alginato de sodio, Tpp, quitosano y maltodextrina (MDX).

Realizando la comparación de los resultados de la dispersión de luz, se realizó un análisis IR a las muestras de mayor eficiencia en las distintas etapas de experimentación de modo que se obtuvo el siguiente espectro, en donde se puede observar cada muestra ya modificada con maltodextrina. Se realizó el espectro de FTIR el cual nos permite observar una señal muy intensa entre  $1,000$  y  $1,100\text{ cm}^{-1}$  la cual representa los enlaces C-O-C de la maltodextrina y del quitosano, posteriormente se observa una señal formada por el grupo amino, dado por la relación del quitosano y la maltodextrina. De modo que podemos comprobar la interacción entre el quitosano y su modificación con maltodextrina.

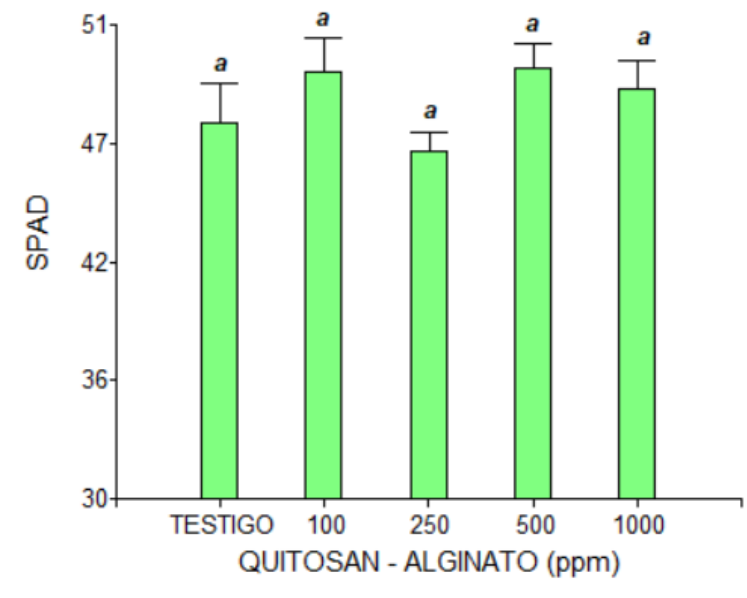


**Figura 4:** Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido de las muestras de NpsQsAlgTpp.

También se le hizo una microscopía electrónica de barrido al producto de quitosano con TPP sin ser modificado con ALG. Se observó que los resultados fueron similares, teniendo la estructura fibrosa de un aerogel.

#### 4.1 Actividad fotosintética

La variable actividad fotosintética, no mostró diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación de medias, no obstante que las aplicaciones de quitosano-alginato a dosis de 100 y 500 mg L<sup>-1</sup> mostraron incremento en la actividad fotosintética en 4.1 y 4.3% en comparación con el testigo. Mohamad et al., 2020). Nos dicen que se han descrito actividades bioestimulantes asociadas principalmente a una mayor actividad fotosintética con el uso de este nanocompuesto.

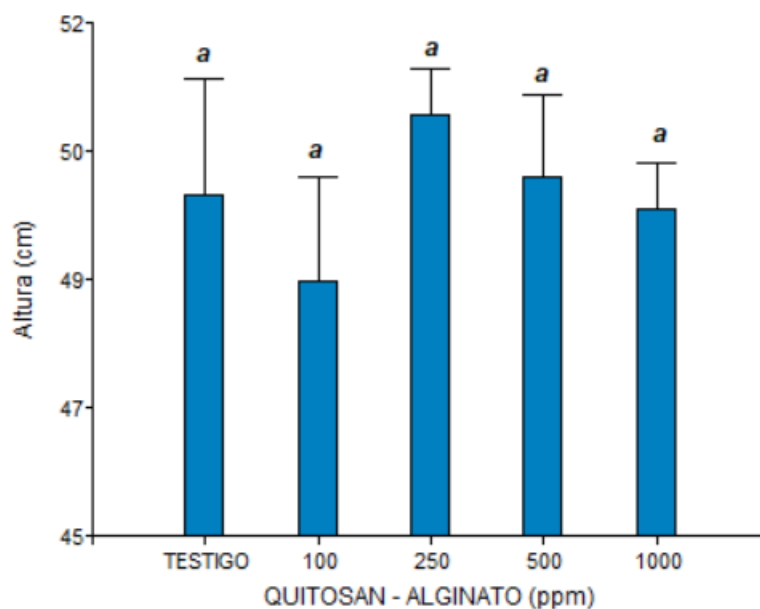


**Figura 5.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre la actividad fotosintética en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

Algunos autores han encontrado estimulación del crecimiento y rendimiento con la aplicación del quitosano en diferentes cultivos como tabaco, frijol y maíz. Esta respuesta se ha atribuido a que el quitosano, estimula la producción de clorofila y la fotosíntesis en las plantas debido a que al contacto con este nanocompuesto la planta activa todos sus mecanismos de defensa lo cual por respuesta genera una actividad fotosintética mayor. (Reyes-Pérez et al., 2020).

## 4.2 Altura de planta

La variable altura, no mostró diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación de medias, no obstante que las aplicaciones de quitosano-alginato a dosis de 250 y 500 mg L<sup>-1</sup> mostraron un mayor incremento en la altura 2.2% y .5% en comparación con el testigo.



**Figura 6.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre la altura en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Zerpa et al, 2017). Reportaron que una de las causas de los bajos rendimientos a nivel mundial del cultivo de arroz, son los daños causados por las enfermedades y en especial las de origen fungoso, siendo entre los 25 y 35 días donde la planta muestra mayor susceptibilidad, se puede denotar que en este trabajo los resultados a los 30 días de las plantas con quitosano poseen una altura de 60,84 cm superior por 9,19% gracias a las propiedades de este.

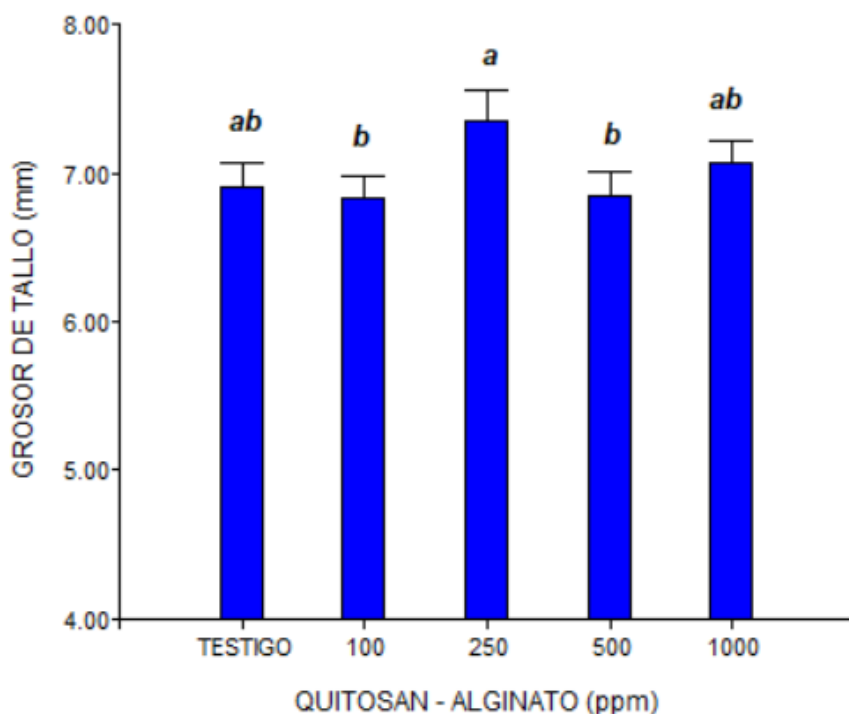
(Reyes-Pérez et al., 2020). Nos muestra que los resultados demuestran que el bioproducto ejerce un efecto estimulante sobre la variable: altura de la planta. La concentración de 300

mg L<sup>-1</sup>, incremento significativamente los valores en la variable evaluada con respecto al tratamiento control.

(Reyes-Pérez et al., 2020). Sugiere que la actividad del quitosano puede variar en dependencia de las características de la especie objeto de estudio.

### 4.3 Grosor de tallo

En la variable grosor de tallo, la prueba de comparación de medias mostró diferencias estadísticas significativas. En este parámetro el nanocompuesto a base de quitosano-alginato aplicado a 250 mg L<sup>-1</sup> promovió un incremento del 6.7% comparado con el tratamiento testigo. En tanto que a 1000 mg L<sup>-1</sup> el incremento fue únicamente del 2.3% sin diferencia significativa con el testigo. Los tratamientos a dosis de 100 y 500 mg L<sup>-1</sup> mostraron efecto negativo en el grosor de tallo al mostrar 1% de reducción en comparación con el testigo.



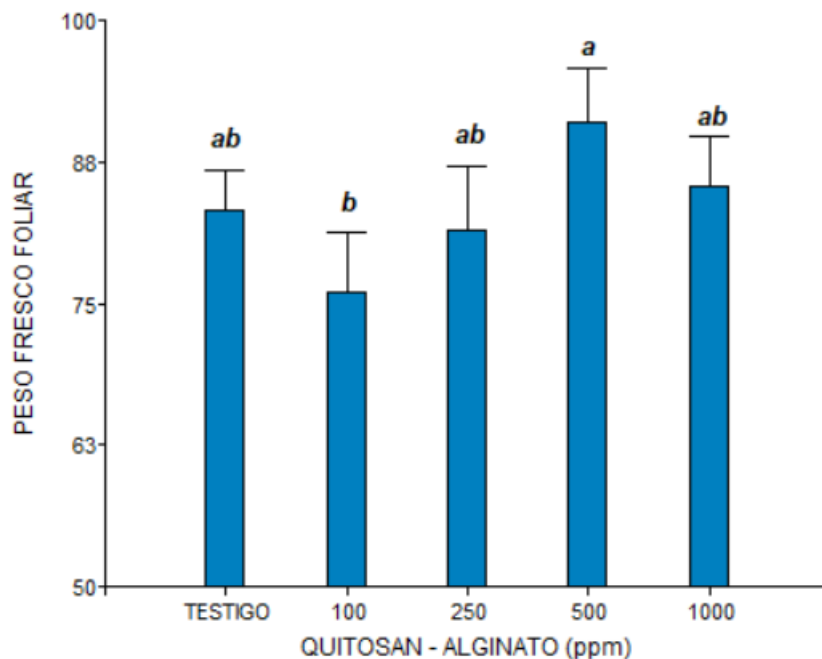
**Figura 7.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre grosor de tallo en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).



(Zerpa et al, 2017). Indica que el quitosano cuando se aplica al inicio de la floración a los cultivos es capaz de estimular su crecimiento tanto en tallos, hojas aumentar los rendimientos de los cultivos al compararlos con las plantas que no se le aplicó esta sustancia.

#### 4.4 Peso fresco foliar

En la variable peso fresco foliar, la prueba de comparación de medias mostró diferencias estadísticas significativas. En este parámetro el nanocompuesto a base de quitosano-alginato aplicado a 500 mg L<sup>-1</sup> promovió un incremento del 9.3% comparado con el tratamiento testigo. En tanto que a 1000 mg L<sup>-1</sup> el incremento fue únicamente del 2.4% sin diferencia significativa con el testigo. El tratamiento a dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> mostraron efecto negativo en el peso fresco foliar al mostrar 8.7% de reducción en comparación con el testigo.



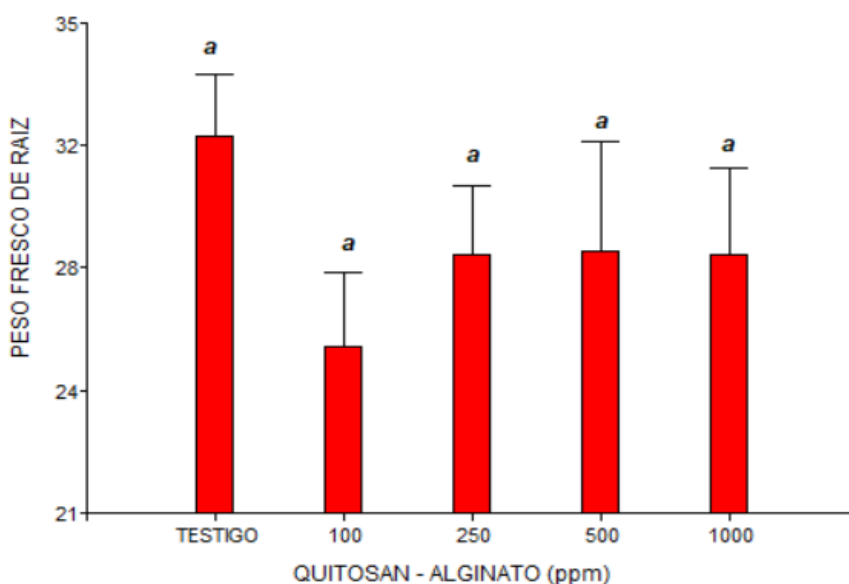
**Figura 8.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A sobre el peso fresco foliar en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Zerpa et al, 2017). Nos dice que el quitosano cuando se aplica al inicio de la floración a los cultivos es capaz de estimular su crecimiento tanto en tallos y hojas de los cultivos al compararlos con las plantas que no se le aplicó esta sustancia.

(Holguin-Peña et al, 2020). En plantas de lechuga en condiciones de invernadero y utilizando quitosano como tratamiento, obtuvieron un mayor peso fresco de la parte aérea y de la raíz. Así mismo reportaron mejora en peso fresco y peso seco de la flor *Eustoma grandiflorum* al utilizar quitosano. En cultivos de tomate al aplicar quitosano como tratamiento, tuvieron resultados efectivos para peso fresco.

#### 4.5 Peso fresco de raíz

La variable peso fresco de raíz, no mostró diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación de medias, no obstante que las aplicaciones de quitosano-alginato a dosis de 100 mg L<sup>-1</sup> mostraron el menor incremento en la altura 25.1% en comparación con el testigo.

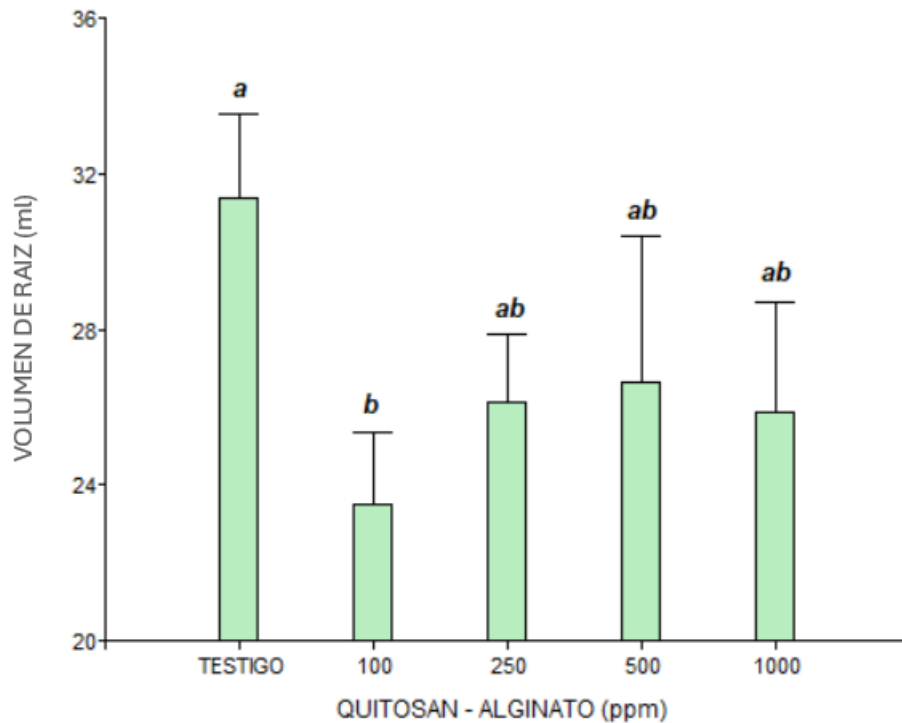


**Figura 9.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A el peso fresco de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Mohamad et al., 2020). Indican que la aplicación de quitosano puede aumentar significativamente el peso fresco de las raíces. Kudasova et al.(2021). Indica que el regulador del crecimiento vegetal sintetizado a base de complejo de cobre en microcápsulas de quitosano/alginato aceleró el desarrollo del sistema radicular del maíz (el aumento tanto en longitud como en peso), pero mostró un efecto menor en el desarrollo de los sistemas radiculares del trigo y la cebada.

#### 4.6 Volumen de raíz

En la variable volumen de raíz, la prueba de comparación de medias mostró diferencias estadísticas significativas. En este parámetro, el nanocompuesto a base de quitosano-alginato no mostró mejora, por el contrario, dicho nanocompuesto en todas las dosis aplicadas mostró afecto negativo y el volumen de raíz se vió mermado, la aplicación 100 mg L<sup>-1</sup> promovió el mayor afecto negativo con un 25.1% de reducción en comparación con el testigo.



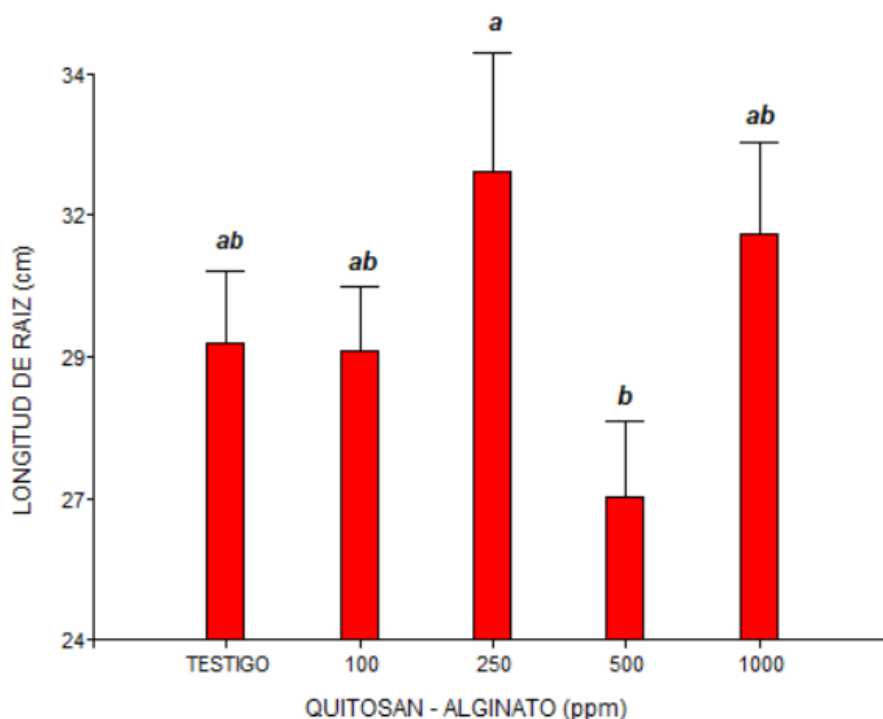
**Figura 10.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en el volumen de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados en este trabajo son contrarios a lo reportado por Zerpa et al. (2017). quienes indican que está demostrado que el quitosano produce un aumento del desarrollo del sistema radicular (raíces y raicillas) y fortalecimiento del vigor y grado de lignificación de las plantas mediante el mecanismo SAR. En general la eficiencia de efecto bioestimulante del quitosano

se debe a su composición y característica de este polímero, una vez que la planta tiene contacto con este compuesto siente que está en presencia de algún hongo patógeno, e inmediatamente empieza a desarrollar todos sus mecanismos de defensas, esto colateralmente produce un aumento significativo en la raíz, permitiéndole absorber más nutrientes, produciendo un fortalecimiento y mayor vigor en ellas.

#### 4.7 Longitud de raíz

En la variable longitud de raíz, la prueba de comparación de medias mostró diferencias estadísticas significativas. En este parámetro el nanocompuesto a base de quitosano-alginato aplicado a 250 mg L<sup>-1</sup> promovió un incremento del 10.3% comparado con el tratamiento testigo. En tanto que a 1000 mg L<sup>-1</sup> el incremento fue únicamente del 6.5% sin diferencia significativa con el testigo. El tratamiento a dosis de 500 mg L<sup>-1</sup> mostro efecto negativo en la longitud de raíz al mostrar 9.4% de reducción en comparación con el testigo.

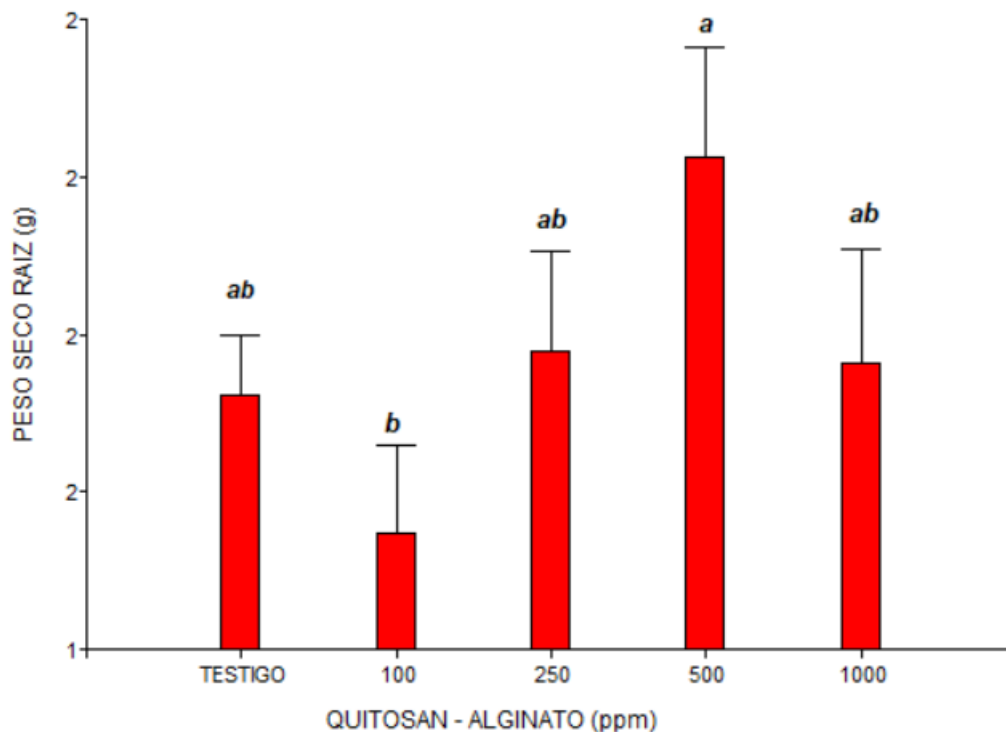


**Figura 11.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en la longitud de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Chakraborty et al., 2020). Indica que el quitosano funciona como promotor del crecimiento de las plantas en diversos cultivos como frijoles, patatas, rábanos, gerberas, soja, repollo y otros cultivos y preparado con concentraciones variadas de CHT (quitosano) conduce a un aumento en el porcentaje de la longitud radical.

#### **4.8 Peso seco raíz**

En la variable peso seco de raíz, la prueba de comparación de medias mostró diferencias estadísticas significativas. En este parámetro el nanocompuesto a base de quitosano-alginato aplicado a  $500 \text{ mg L}^{-1}$  promovió un incremento del 26.7% comparado con el tratamiento testigo. En tanto que a  $250 \text{ mg L}^{-1}$  el incremento fue únicamente del 4.7% sin diferencia significativa con el testigo. El tratamiento a dosis de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  mostro efecto negativo en peso seco de raíz al mostrar 15.7% de reducción en comparación con el testigo.



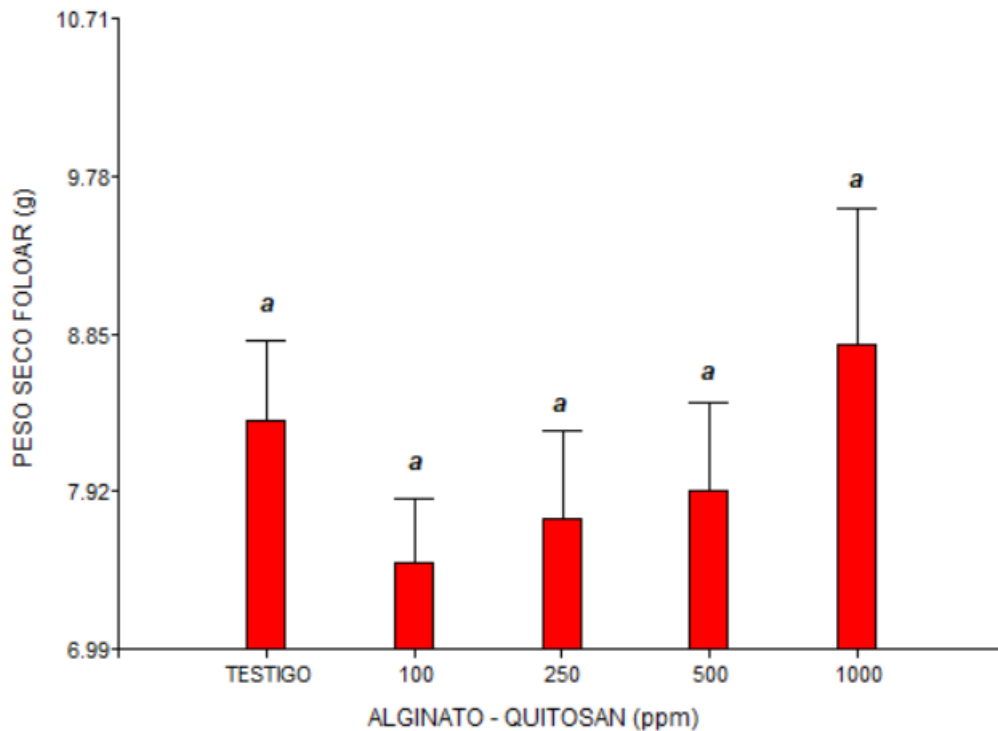
**Figura 12.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en peso seco de raíz en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Mohamad et al., 2020). La aplicación de quitosano puede aumentar significativamente el peso seco de las raíces. Chanaluisa-Saltos et al. (2022) determinaron que en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a los 20 días después de siembra, el quitosano no estimula biomasa seca de la raíz. Sin embargo, las aplicaciones de quitosano intervienen en el desarrollo de biomasa seca de las raíces de tomate. Esto posiblemente se deba a que el método de aplicación de quitosano es mediante aspersión en las partes aéreas de la planta.

#### 4.9 Peso seco foliar

La variable peso seco foliar, no mostró diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de comparación de medias, no obstante que las aplicaciones de quitosano-alginato

a dosis de 1000 mg L-1 mostraron incremento en el peso seco foliar 5.3% en comparación con el testigo.



**Figura 13.** Impacto de la aplicación de diferente dosis del nanocompuesto Q-A en el peso seco foliar en plantas de tomate rojo. Q-A= quitosano-alginato. Letra diferente representa diferencias estadísticas con ( $p \leq 0.05$ ).

(Pichyangkura, & Chadchawan, 2015). Nos indica que el quitosano se puede utilizar para mejorar el crecimiento de cultivos de hortalizas. La adición de 1,0% de quitosano de alto PM (600–900 kDa) al suelo mejoró la altura de las plantas, los diámetros del dosel y las áreas foliares del chile.



## V. CONCLUSION

El nanocompuesto a base de quitosano-alginato promovió ciertos parámetros morfológicos de las plantas de tomate rojo como lo fue el grosor de tallo, longitud de raíz, peso fresco foliar y peso seco raíz. Se destaca de este experimento que si bien el quitosano no puede suplir la función de un elemento o una nutrición vegetal una aplicación correcta del nanocompuesto quitosano-alginato puede bioestimular a la planta en un mayor vigor y estimulando a que las raíces tengan mayor longitud. Si bien no se tiene certeza de cuál es la concentración adecuada de este nanocompuesto para obtener su mayor eficacia, es importante continuar las investigaciones ya que puede obtenerse un aporte de manera natural sin dañar al suelo con este nanocompuesto además de todos los beneficios que este brinda las plantas.

## VI. Bibliografías

Abd-Alla, M.A., Haggag, W.M. (2010). New safe methods for controlling anthracnose disease of mango (*Mangifera indica* L.) fruits caused by *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.). *J. Am. Sci.* 8, 361–367

Ali, A., Mohamed, M.T.M., Siddiqui, Y. (2012). Control of anthracnose by chitosan through stimulation of defence-related enzymes in Eksotika II papaya (*Carica papaya* L.) fruit. *J. Biol. Life Sci.* 3, 114–126.

Ali, A., Muhammad, M.T.M., Sijam, K., Siddiqui, Y. (2010). Potential of chitosan coating in delaying the postharvest anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) of Eksotika II papaya. *Int. J. Food Sci. Technol.* 45, 2134–2140.

Ali, A., Noh, N.M., Mustafa, M.A. (2015). Antimicrobial activity of chitosan enriched with lemongrass oil against anthracnose of bell pepper. *Food Packag. Shelf Life* 3, 56–61.

Ali, A., Zahid, N., Manickam, S., Siddiqui, Y., Alderson, P.G., Maqbool, M. (2013). Effectiveness of submicron chitosan dispersions in controlling anthracnose and maintaining quality of dragon fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 86, 147–153.

Ali, A., Zahid, N., Manickam, S., Siddiqui, Y., Alderson, P.G., Maqbool, M. (2014). Induction of lignin and pathogenesis related proteins in dragon fruit plants in response to submicron chitosan dispersions. *Crop Prot.* 63, 83–88.

Aranaz, I., Alcántara, AR, Civera, MC, Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Quitosano: una descripción general de sus propiedades y aplicaciones. *Polímeros* , 13 (19), 3256. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>

Azmana, M., Mahmood, S., Hilles, A. R., Rahman, A., Arifin, M. A. B., & Ahmed, S. (2021). A review on chitosan and chitosan-based bionanocomposites: Promising material for combatting global issues and its applications. *International journal of biological macromolecules*, 185, 832-848. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021014604>

Chakraborty, M., Hasanuzzaman, M., Rahman, M., Khan, M. A. R., Bhowmik, P., Mahmud, N. U., ... & Islam, T. (2020). Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer. *Agriculture*, 10(12), 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120624>

Chanaluisa-Saltos, J. S., Álvarez Sánchez, A. R., Reyes-Pérez, J. J., Lizarde, N. A. (2022). Respuesta Agronómica y Fitosanitaria de plantas de Tomate (*solanum lycopersicum* l.) a la aplicación de Quitosano en condiciones controladas. *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(1), 139-145. <file:///C:/Users/1087552884/Downloads/528-Texto%20del%20art%C3%ADculo-999-1-10-20220523.pdf>

Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R. et al. (2017) Acción bioestimulante de los hidrolizados de proteínas: desentrañando sus efectos sobre la fisiología y el microbioma de las plantas. *Frontiers in Plant Science*, **8**, 2202. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202>

Deolu-Ajayi, A. O., van der Meer, I. M., Van der Werf, A., & Karlova, R. (2022). The power of seaweeds as plant biostimulants to boost crop production under abiotic stress. *Plant, Cell & Environment*, *45*(9), 2537-2553. <https://doi.org/10.1111/pce.14391>

Gómez-Matos, M., Martínez-Balmori, D., & Coll-García, Y. (2023). Alginato y sus oligosacáridos a partir de algas pardas de arribazón: preparación y bioactividad agrícola. Una revisión. *Revista Cubana de Química*, *35*(1), 46-67. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v35n1/2224-5421-ind-35-01-46.pdf>

Goy, R. C., Britto, D. D., & Assis, O. B. (2009). A review of the antimicrobial activity of chitosan. *Polímeros*, *19*, 241-247.

Holguin-Peña, Ramón Jaime, Vargas-López, Juan Manuel, López-Ahumada, Guadalupe Amanda, Rodríguez-Félix, Francisco, Borbón-Morales, Carlos Gabriel, & Rueda-Puente, Edgar Omar. (2020). Efecto de quitosano y consorcio simbiótico benéfico en el rendimiento de sorgo en la zona indígena “Mayos” en Sonora. *Terra Latinoamericana*, *38*(3), 705-714. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.669>

INECOL (2020). La planta madre del jitomate, un aporte ancestral. Inecol.mx. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1069-la-planta-madre-del-jitomate-un-aporte-ancestral>

*Instituto Nacional de Seguridad E Higiene En el Trabajo INSHT*. (2015). Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales. <https://www.insst.es/documents/94886/96076/sst+nanomateriales/bd21b71f-d5ec-4ee8-8129-a4fa58480968>

INTAGRI (2015). La Nanotecnología en la Nutrición Vegetal <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/la-nanotecnologia-en-la-nutricion->

vegetal

INTAGRI (2018). El Cultivo de Tomate. Serie Hortalizas. Núm. 14. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 9 p.

Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/el-cultivo-de-tomate>

INTAGRI. (2020). Bioestimulantes Agrícolas, Definición, Principales Categorías y Regulación a Nivel Mundial. Intagri.com.

<https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/bioestimulantes-agricolas-definicion-y-principales-categorias>

Juric, S., Jurić, M., Režek Jambrak, A., & Vinceković, M. (2021). Tailoring alginate/chitosan microparticles loaded with chemical and biological agents for agricultural application and production of value-added foods. *Applied sciences*, 11(9), 4061.

Kananont, N., Pichyangkura, R., Chanprame, S., Chadchawan, S., & Limpanavech, P. (2010). Chitosan specificity for the in vitro seed germination of two *Dendrobium* orchids (Asparagales: Orchidaceae). *Scientia Horticulturae*, 124(2), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.11.019>

Khan, W., Rayirath, UP, Subramanian, S., Jithesh, MN, Rayorath, P., Hodges, DM, Critchley, AT, Craigie, JS, Norrie, J. & Prithiviraj, B. (2009). Extractos de algas como bioestimulantes del crecimiento y desarrollo vegetal. *Revista de regulación del crecimiento vegetal*, 28, 386 – 399. Disponible de: <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>

Klarzynski, O., Descamps, V., Plesse, B., Yvin, JC, Kloareg, B. y Fritig, B. (2003). Los oligosacáridos de fucano sulfatados provocan respuestas de defensa en el tabaco y resistencia local y sistémica contra el virus del mosaico del tabaco. *Interacciones moleculares entre plantas y microbios*, 16 ( 2 ), 115-122. Disponible de: <https://doi.org/10.1094/MPMI.2003.16.2.115>

Kudasova, D., Mutaliyeva, B., Vlahoviček-Kahlina, K., Jurić, S., Marijan, M., Khalus, S. V., ... & Vinceković, M. (2021). Encapsulation of synthesized plant growth regulator based on copper (ii) complex in chitosan/alginate microcapsules. *International journal of molecular sciences*, 22(5), 2663. <https://www.mdpi.com/1422-0067/22/5/2663>

Kundu, A., Mukhopadhyay, A. y Sarkar, S. (2021). Papel de los nanocompuestos como herramientas de administración de herbicidas en la protección de cultivos. *Agricultura y alimentación: boletín electrónico* , 3 , 499-501.

Limpanavech, P., Chaiyasuta, S., Vongpromek, R., Pichyangkura, R., Khunwasi, C., Chadchawan, S., Lotrakul, P., Bunjongrat, R., Chaidee, A., & Bangyeekhun, T. (2008). Chitosan effects on floral production, gene expression, and anatomical changes in the *Dendrobium* orchid. *Scientia Horticulturae*, 116(1), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.10.034>

Lin, W., Hu, X., Zhang, W., Rogers, W. J., & Cai, W. (2005). Hydrogen peroxide mediates defence responses induced by chitosans of different molecular weights in rice. *Journal of Plant Physiology*, 162(8), 937–944. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.10.003>

Lira Saldívar, Ricardo Hugo, Méndez Argüello, Bulmaro, Santos Villarreal, Gladys De los, & Vera Reyes, Ileana. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>

Lizarazo-Salcedo, César Germán, González-Jiménez, Edgar Emir, Arias-Portela, Claudia Yohana, & Guarguati-Ariza, Juliana. (2018). Nanomateriales: un acercamiento a lo básico. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 64(251), 109-118. [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&tlng=es](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&tlng=es).

Liang, C., Yuan, F., Liu, F., Wang, Y. y Gao, Y. (2014). Estructura y mecanismo antimicrobiano de los conjugados  $\epsilon$ -polilisina-quitosano mediante la reacción de Maillard. *Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas* , 70 , 427-434.

Marín-Bustamante, M. Q., Hernández-Flores, A., & Cásarez-Santiago, R. G. (2021). Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de Contaminantes. *Revista Salud y Administración*, 8(23), 29-35. <http://revista.unsis.edu.mx/index.php/saludyadmon/article/view/214>

Mohamad, H., Shahrajabian, S. and Petropoulos, A. (2021). El quitosano como bioestimulante vegetal en la horticultura moderna - [Biostimulant.com](http://Biostimulant.com).

Bioestimulante.com. <https://www.biostimulant.com/es/chitosan-as-plant-biostimulant-in-modern-horticulture/>

Mukherjee, A. & Patel, JS ( 2020 ). Extracto de algas marinas: bioestimulador de la defensa y la productividad de las plantas . *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Ambientales* , **17** , 553 – 558 . Disponible de: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>

NHGRI (2024). National Human Genome Research Institute home. Genome.gov. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Nanotecnologia>

Palma-Guerrero, J., Jansson, H.-B., Salinas, J., Lopez-Llorca, L.V., (2008). Effect of chitosan on hyphal growth and spore germination of plant pathogenic and biocontrol fungi. *J. Appl. Microbiol.* **104**, 541–553.

Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2015). Biostimulant activity of chitosan in horticulture. *Scientia Horticulturae*, **196**, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.031>

Procuraduría Federal del Consumidor. (2020). *Jitomate, versátil y nutritivo*. gob.mx. PROFECO <http://www.gob.mx/profeco/articulos/jitomate-versatil-y-nutritivo?state=published>

Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Ramírez-Arrebato, M. Á., Zúñiga Valenzuela, E., Lara-Capistrán, L., & Hernández-Montiel, L. G. (2020). Efecto del quitosano sobre variables del crecimiento, rendimiento y contenido nutricional del tomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, **11**(3), 457-465. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2147/1/PUB-ARTICULO-4851.PDF>

Rodríguez González, V. y Cervantes Diaz E. (2024) Potencial de los nanomateriales en la agricultura: retos y oportunidades. Unam.mx. <https://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/69802/62375>

Saberi Riseh, R., Gholizadeh Vazvani, M., Ebrahimi-Zarandi, M., & Skorik, Y. A. (2022). Alginate-induced disease resistance in plants. *Polymers*, **14**(4), 661. <https://doi.org/10.3390/polym14040661>

Sahoo, D., Mandal, A., Mitra, T., Chakraborty, K., Bardhan, M., & Dasgupta, A. (2018). Nanosensing of Pesticides by Zinc Oxide Quantum Dot: An Optical and Electrochemical Approach for the Detection of Pesticides in Water. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(2), 414-423.

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2017). Planeación Agrícola Nacional (2017-2030) SADER <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *El jitomate, hortaliza mexicana de importancia mundial*. SADER. <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022). SIAP Escenario mensual de productos agroalimentarios. Gob.mx. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/784856/Jitomate\\_Noviembre.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/784856/Jitomate_Noviembre.pdf)

Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (2023). Panorama Agroalimentario de México. SADER-SIAP. México. 220 p.

Sharif, R., Mujtaba, M., Ur Rahman, M., Shalmani, A., Ahmad, H., Anwar, T., ... & Wang, X. (2018). The multifunctional role of chitosan in horticultural crops; a review. *Molecules*, 23(4), 872. <https://doi.org/10.3390/molecules23040872>

Shukla, PS, Mantin, EG, Adil, M., Bajpai, S., Critchley, AT & Prithiviraj, B. (2019). Bioestimulantes a base de *Ascophyllum nodosum* : aplicaciones sostenibles en la agricultura para la estimulación del crecimiento de las plantas, la tolerancia al estrés y manejo de enfermedad. *Frontiers in Plant Science*, 10, 655. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>

SIAP. (2017). Atlas Agroalimentario 2017. SIAP-SAGARPA. México. 231 p.

Stasińska-Jakubas, M., & Hawrylak-Nowak, B. (2022). Protective, biostimulating, and eliciting effects of chitosan and its derivatives on crop plants. *Molecules*, 27(9), 2801. <https://doi.org/10.3390/molecules27092801>

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., ... & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges, and future opportunities. *Science of the total environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>

Vargas, S.D.R., & Zamora, F.J. L. (2017). Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Tesis de Licenciatura. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia. In: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15293>

Vázquez-Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 16(30). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912023000100301&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912023000100301&script=sci_arttext)

Xing, M., Cao, Q., Wang, Y., Xiao, H., Zhao, J., Zhang, Q., ... & Song, S. (2020). Advances in research on the bioactivity of alginate oligosaccharides. *Marine drugs*, 18(3), 144. <https://doi.org/10.3390/md18030144>

Xu, J., Zhao, X., Han, X., Du, Y., 2007a. Antifungal activity of oligochitosan against *Phytophthora capsici* and other plant pathogenic fungi in vitro. *Pestic. Biochem. Physiol.* 87, 220–228.

Youssef, K., de Oliveira, A. G., Tischer, C. A., Hussain, I., & Roberto, S. R. (2019). Synergistic effect of a novel chitosan/silica nanocomposites-based formulation against gray mold of table grapes and its possible mode of action. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.249>

Zerpa, J. A. M., Rincón, M. C., Rincón, D., & Colina, J. A. V. (2017). Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *RIAA*, 8(2), 151-165.