

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Síntesis de nanopartículas poliméricas funcionalizadas con yodo y su uso como  
bioestimulante vegetal

Por:

**VANESSA LÓPEZ LANDA**

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial para**

**Obtener el Título de:**

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISION DE INGENIERÍA

**Síntesis de nanopartículas poliméricas funcionalizadas con yodo y su uso  
como bioestimulante vegetal.**

POR:  
**VANESSA LÓPEZ LANDA**

TESIS

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

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por:

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Carlos Alberto Garcia Agustince  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Vocal

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Susana Gonzales Morales  
Vocal

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Hendo Saade Caballero  
Vocal



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

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad que no se incurrió un plagio o conducta incorrecta 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 (auto plagio); comprar robar o pedir prestados los prestados o la tesis para presentarla como propia; 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, graficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente, asi mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

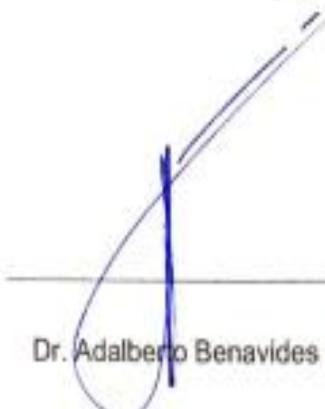
Pasante



---

Vanessa López Landa

Asesor principal



---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

# AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater

UAAAN: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por la preparación profesional y las oportunidades que me brindo para poder seguir con mis estudios, a las diferentes enseñanzas que pude obtener, las cuales siempre las llevare en el corazón.

A mi asesora:

Dra. Julia R. Medrano Macias, la cual me dio una oportunidad con este proyecto de investigación, sobre todo por ser mi guía y tenerme paciencia durante este proceso.

A mis compañeros de Universidad:

Aquellos que a lo largo de mi carrera formaron parte de mi vida, los cuales me apoyaron y motivaron en su momento para seguir echándole ganas a la universidad.

A mi amiga:

**Azalia Carolina Magdaleno** la cual, con poco tiempo de conocernos y convivir, me demostró apoyo incondicional, y me motivo a seguir con este proyecto, gracias por siempre recibirme en tu casa y hacer mi estancia más placentera en Saltillo, y estar cuando más necesite de una buena amiga.

A mi amigo:

**Alfonzo Gonzales** el cual siempre me ha apoyado, al permitirme quedar en su casa, y convivir con su familia, para no sentirme sola a la distancia sin mi familia, y hacerme parte de la suya, cada que lo necesitaba.

A mi cuñada:

**Brenda L. Martínez Fernández** la cual me ha demostrado y en señado lo que es tener una mejor amiga, por hacerme sentir el amor de una hermana, y por celebrarme cada logro que he tenido en mi vida.

## Al CIQA:

Agradezco al “Centro de Investigación de Química Aplicada” por su colaboración con mi asesora para que este proyecto pudiera llevarse a cabo, en especial a Julieta Sánchez, Javier Enríquez, Alejandro Díaz, por el apoyo en la caracterización de las nanopartículas.

## A mi asesora externa:

**Hened Saade Caballero** por tenerme la confianza, paciencia y disposición para explicarme sobre el tema de las nanopartículas, y darme la oportunidad de que fuera mi guía también este proyecto.

## DEDICATORIA

### A mis Padres:

**Floriberto López Martínez y Lorena Landa Reyes** por siempre apoyarme en cada una de las decisiones que he tomado, por siempre buscar la manera para que yo pudiera tener una buena educación y poder concluir mis estudios, por siempre ser mis pilares a lo largo de mi carrera profesional, y por siempre escucharme.

### A mi hermano:

**Hedilberto López Landa** por ser mi confidente, por cuidarme desde que era una niña, y enseñarme siempre cosas nuevas.

### A mis abuelitas:

Las cuales siempre me demostraron amor puro e incondicional, por criarme como una hija, por siempre pedirle a Dios por mí para que me diera sabiduría y entendimiento para poder seguir y terminar mis estudios.

### A mis abuelos:

Por qué han sido un ejemplo para seguir, por compartirme fragmentos de su vida para que yo pueda aspirar a una mejor vida y no sufra tanto para conseguir mis objetivos así como ellos lo hicieron.

### A mis primos:

**Alexis Landa Paris, Axel Landa Paris y Diana Landa Paris** por ser como mis hermanos y por el apoyo que en su momento me han brindado.

A mis sobrinos:

Por qué a pesar de que están pequeños me han salvado sin saberlo, por darme su amor, y hacer reír con sus travesuras, en especial a **Gael Landa Paris** y **Ariel Paris Hdez.** por ser ese curita al corazón que estando en clases en línea necesite.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	8
ÍNDICE DE CUADROS.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
RESUMEN .....	10
I.INTRODUCCIÓN .....	11
II.HIPOTESIS.....	13
III.OBJETIVOS.....	14
3.1 GENERALES.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
IV. REVISION DE LITERATURA .....	15
V. MATERIALES Y METODOS .....	23
5.1 SINTESIS DE NANOPARTÍCULAS.....	23
5.1.1 Parte Experimental.....	23
5.1.2 Reactivos y Materiales .....	23
5.1.3 Equipo.....	23
5.1.4 Purificación de monómero.....	25
5.1.5 Síntesis de nanopartículas.....	25
5.3 Efecto de bioestimulación vegetal de las nanopartículas funcionalizadas con yodo en plántulas de tomate.....	28
5.3.5 Medición de variables de crecimiento.....	30
VI. RESULTADOS.....	30
6.1 Síntesis y caracterización de nanopartículas.....	31
6.2 Tamaño de la nanopartícula por DLS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3 Resonancia magnética nuclear de protón ( <sup>1</sup> H NMR).....	33
6.4 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).....	34
6.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Dispersión de rayos X .....	36
6.5 Medición del efecto de bioestimulación .....	37
6.5.1 Número de folíolos.....	37
6.5.2 Altura .....	38
6.5.3 Diámetro del tallo.....	39
6.6 Peso fresco y seco de todas las variables .....	39

6.6.1 Peso fresco de la hoja.....	39
6.6.2 Peso seco de la hoja .....	40
6.6.3 Peso fresco del tallo .....	42
6.6.4 Peso seco del tallo .....	42
6.6.5 Peso fresco de la raíz .....	43
6.6.7 PESO FRESCO TOTAL .....	44
6.6.8 PESO SECO TOTAL .....	44
6.6.9 AREA TOTAL .....	45
VIII. DISCUSIÓN .....	47
IX. CONCLUSIÓN.....	50
X. BIBLIOGRAFÍA.....	51

## ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Descripción de las dos reacciones.....	25
Tabla 2. Tratamientos utilizados.....	28
Tabla 3. Concentraciones de la solución nutritiva según (Steiner, 1961) .....	29
Tabla 4. Tamaño del diámetro de la nanopartícula en las dos reacciones. ....	31
Tabla 5. El compendio de todos los datos encontrados, se muestran en la siguiente tabla. ....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Saldivar et al, (2018). Imagen que ilustra la aplicación de nanopartículas de manera foliar y a través de la raíz, y su traslocación en la planta a través del floema y la xilema.....	21
Figura 2. Histograma de dn, obtenido por QLS.....	32
Figura 3. Microscopía SEM de la nanopartícula funcionalizada con yodo.....	37
Figura 4. La siguiente grafica muestra el número de foliolo en los diferentes tratamientos. ..	38
Figura 5. Gráfico de la altura de las plántulas. ....	39
Figura 6. En la siguiente Gráfico se concentran los resultados del tamaño del diámetro del tallo. ....	39
Figura 7. En este Gráfico se puede observar que los tratamientos no tuvieron diferencias significativas con los distintos tratamientos. ....	40
Figura 8. En el gráfico se muestra que con los tratamientos 1 y 2, los cuales son las concentraciones más bajas de la nanopartícula, hubo una reducción en el peso seco de la hoja.....	41

## RESUMEN

La agricultura para poder cumplir la alta demanda de alimentos que se requieren hoy en día, así como también darle una solución al estrés oxidativo que las plantas sufren, busca alternativas sostenibles que sean amigables con el medio ambiente. Los bioestimulantes al ser sustancias naturales o a base de microorganismos estimulan los procesos de las plantas, al tener una mayor absorción de nutrientes y por ende una mayor resistencia a los diferentes tipos de estrés. Es por lo que se buscó como alternativa sintetizar nanopartículas poliméricas funcionalizadas con yodo, debido que este participa en procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, y para aprovecharlo mejor se inmovilizaron con las nanopartículas, por sus propiedades únicas de estas, además de que también tienen un efecto bioestimulante. El tomate al ser un cultivo de gran importancia a nivel mundial, se decidió buscar un beneficio para este, al evaluar el efecto bioestimulante de las nanopartículas funcionalizada con yodo y yoduro de potasio, sobre las variantes del crecimiento de las plántulas de este mismo. El estudio se llevó a cabo a través de un diseño experimental, con 5 tratamientos: nanopartículas (T1-I 10 PP,) T2-I 50 Y T3-I100, KI 100 ppm y un testigo, con 10 repeticiones cada uno. En los resultados obtenidos se observó que la nanopartícula en su caracterización tuvo una conversión del 75 al 95% con el tamaño requerido, que al ser aplicadas independientemente de su concentración redujo el número de hojas, la altura, sin tener un efecto sobre la biomasa fresca o seca en comparación con las plantas testigos. Por otro lado. La aplicación foliar de KI evidencio un incremento en el diámetro del tallo, un incremento en el peso fresco de tallo, hojas y raíz, así como el peso seco total. Por lo anterior se puede concluir que al aplicar yoduro de potasio si se tuvo un efecto bioestimulante en el crecimiento de las plántulas de tomate, en la cuestión de las nanopartículas funcionalizadas con

yodo, pese a los diferentes tamaños, no se pudo lograr observar que haya tenido un efecto positivo en el crecimiento de la plántula.

**Palabras claves:** Bioestimulante, Nanopartículas, Poliméricas.

## I.INTRODUCCIÓN

A través de los años la agricultura ha estado evolucionando para poder seguir proporcionándonos alimentos, debido a la alta demanda que se requiere, así como para enfrentar los diferentes desafíos que se presenten como el estrés biótico y abiótico, calidad de la producción, las diferentes enfermedades y patógenos que dañan a las plantas (Seppelt et al. 2022). En la actualidad lo que se busca es sostenibilidad para el cuidado del medio ambiente, la reducción del uso de agroquímicos sin afectar la producción y calidad del producto (Sarandon y Flores 2014). Por otro lado, los productores requieren una mejor eficiencia del uso de nutrientes por parte de la planta, y un aumento en la tolerancia contra los diferentes tipos de estrés. El uso de bioestimulante ha tenido un gran auge en la agricultura, por su beneficio al contrarrestar los factores ya mencionados con anterioridad (Paz Arteaga; 2022). La definición de bioestimulante no está bien definida debido a la variedad de insumos que pueden considerarse un bioestimulante, Los dos grandes de la industria (en Europa EBIC y en América del Norte) de bioestimulantes lo definieron “como sustancias o microorganismos, que estimulan los procesos naturales al ser aplicados a las plantas y a la rizosfera, para mejorar la capacidad de absorción, asimilación y eficiencia estos, así como la calidad de los cultivos”. (Calvo Pamela; 2014). Por otro lado, las nanopartículas también cumplen un papel importante en la agricultura, estas pueden ser nanopartículas metálicas, poliméricas, orgánicas o sintéticas que pueden coadyuvar a desarrollar una función bioestimulante en las plantas, las cuales son utilizadas por sus características únicas como son

su: tamaño, forma, su alta relación superficie/ volumen, y sus propiedades magnéticas, entre otras (Rawtani et al, 2020). Estas se pueden aplicar de diferente manera ya sea de manera foliar o vía raíz, en pequeñas dosis. Está demostrado que al ser encapsulado ingredientes activos en nanopartículas aumentan la efectividad de sus ingredientes químicos, debido que se reduce su volatilización, toxicidad, lixiviación y contaminación de los agroecosistemas, haciendo que la planta aproveche más ese ingrediente activo (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2020).

A pesar de que es de suma importancia para los animales y es fuertemente acumulado en algas marinas, en las plantas no se considera como un micronutriente, sin embargo, un gran número de estudios ha demostrado lo contrario ya que muestran que el yodo participa en los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas. Por el contrario, para que las plantas puedan absorberlo o adquirirlo a través del suelo existe un número de factores involucrados, pese a que el yodo puede encontrarse en el suelo de manera orgánica e inorgánica, su composición del suelo, su textura, pH, y las condiciones redox del suelo controlan la movilidad del yodo y su especiación, afectando que las raíces lo puedan absorber. En las plantas el yodo debe tener un equilibrio, debido que en bajas concentraciones es beneficioso, pero a altas concentraciones inhibe la absorción por medio de las raíces y por encima del umbral este se vuelve tóxico. En la atmósfera se encuentra de forma gaseosa las especies de yodo orgánico e inorgánico pero el grado de absorción de yodo que tiene las hojas es de manera marginal (Gonzali et al., 2017a).

Por lo mencionado anteriormente se buscó una alternativa para que por medio de las hojas las plantas pudieran absorber el yodo de una manera más eficiente, por lo que el yodo se adhirió a una nanopartícula polimérica para evitar su volatilización y haciendo que esta lo aproveche.

## II.HIPOTESIS

Se sintetizarán nanopartículas de poli metacrilato de metilo funcionalizadas con yodo, las cuales, aplicadas de manera foliar en plántulas de tomate evidenciarán un efecto bioestimulante sobre el crecimiento.

### III.OBJETIVOS

#### 3.1 GENERALES

1. Sintetizar nanopartículas de poli (metacrilato de metilo) funcionalizadas con yodo y evaluar los efectos de bioestimulación sobre el crecimiento de las plantas de tomate.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Sintetizar nanopartículas de poli (metacrilato de metilo) funcionalizadas con yodo
2. Caracterizar las nanopartículas funcionalizadas con yodo por DLS Microscopia Electrónica, Infrarrojo y Resonancia Magnética Nuclear.
3. Evaluar el efecto bioestimulante de las nanopartículas sobre variables de crecimiento de plántulas de tomate.

## IV. REVISION DE LITERATURA

### 4.1 Agricultura

La agricultura, así como la ganadería y producción artesanal se vio afectada desde los inicios de la revolución industrial, esto debido que las necesidades de las personas fueron cambiando y se enfocaron más en la producción industrial y comercial. Esto propicio el aumento de la población y de la industrialización, esto trajo consigo cosas favorables y desfavorables, en donde las segundas provocaron que las personas migraran del campo a la ciudad, así como la degradación de tierras, paisajes y deterioro ambiental. Fue entonces que a finales del siglo XIX se dio la industrialización de la agricultura, específicamente en el año de 1870 fue que empezaron los grandes cambios, en donde las innovaciones agrarias empezaron aparecer, como lo fue la mecanización del trabajo de campo, los abonos artificiales y los fertilizantes, los cuales, hoy en día, tienen un fuerte impacto ambiental negativo. En donde la combinación de estos afecta la calidad del suelo, debido que estos se hacen más vulnerables a la erosión del suelo y a la pérdida de nutrientes (Rodríguez et al., 2021).

Como se mencionó anteriormente, no solo el incremento de la población forma parte de la crisis alimentaria, el cambio climático, la reducción del agua aceptable para la agricultura y el cambio del uso del suelo, también forman parte de esto. En base a esto la FAO pronostico que para el 2050 la población es de aproximadamente 9.1 mil millones de habitantes. Se estima que a nivel mundial y en países en desarrollo la producción de alimentos debe incrementarse en un 50 % en la primera y un 70 % en la segunda. Es un reto alcanzar este porcentaje cuando pocas personas viven en el campo y la mayoría está en la ciudad, pero el desafío esta no solo en producir alimentos para una creciente población, está en hacerlo asegurando el agua limpia, la mano de obra, la energía y sobre todo el suelo agrícola (Ochoa, 2018).

## 4.2 Bioestimulantes vegetales

La palabra bioestimulante fue acuñada por especialistas de horticultura los cuales la utilizaron para describir sustancias que promueven el crecimiento de las plantas, sin estos ser nutrientes o mejoradores del suelo. Pero en el año 1997 en una revista web dos personajes (Zhang y Schmidt) del instituto politécnico de virginia definieron los bioestimulantes como “material que, en cantidades mínimas, promueven el crecimiento de las plantas” ellos se referían como bioestimulante a los ácidos húmicos y los extractos de algas.

Sin embargo, al paso del tiempo más autores fueron dando sus propias definiciones de lo que ellos consideraban como bioestimulante. Por ejemplo, en el ámbito de la literatura científica Kauffman definió a los bioestimulantes como materiales distintos a los fertilizantes los cuales promueven el crecimiento de las plantas en bajas concentraciones, este puede estar disponible con ingredientes diferentes y variedad de formulaciones, pero este autor los clasifico en tres categorías según su fuente y contenido las cuales son sustancias húmicas, productos que contienen hormonas y productos que contienen aminoácidos. Pese a estas definiciones que se han dado para tener una idea de lo que es un bioestimulante aún no se tiene una definición legal actualmente.

Los bioestimulantes se han aplicado con antigüedad en la agricultura, pero el termino hasta el día de hoy no tiene una definición definida, como mencione anteriormente, la aparición de este término empezó aparecer en la década de los noventa, en artículos e investigaciones donde se les mencionaba como bioactivadores agrícolas.

En el área agronómica existen diferentes tipos de bioestimulantes por mencionar algunos:

Hongos micorrizas: sirven para la proliferación de pelos radiculares, ayudando a la absorción de macro y micronutrientes, el equilibrio hídrico y la protección del estrés biótico y abiótico de las plantas.

Ácidos húmicos y fúlvicos: estos tienen un efecto positivo en el crecimiento de las plantas, esto debido a que contribuyen una mejora en la nutrición de las raíces, ayudando a que estas tengan una mejor absorción de micro y macronutrientes, así como también mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En el cultivo de maíz de manera hidropónica mejoran la actividad de enzimas para el metabolismo de compuestos de fenilpropanoides los cuales son fundamentales para la producción de compuestos fenólicos.

Hidrolizados de proteínas y otros compuestos que contienen nitrógeno: las mezclas de aminoácidos y péptidos elaborados a partir de subproductos agroindustriales vegetales y animales sirven para tener un efecto de nodulación en la planta para que esta pueda absorber y asimilar el N. Producen efectos quelantes que protegen a la planta de metales pesados, participan en la movilidad y adquisición de micronutrientes, aumentan la biomasa y actividad microbiana, en el suelo aumentan su respiración y fertilidad, a través de las raíces las actividades quelantes y complejantes de algunos aminoácidos y péptidos específicos colaboran en la disponibilidad y adquisición de nutrientes.

Extractos de algas y botánicos: en el suelo y en las plantas las algas tienen efectos positivos, en el suelo ayuda a la retención de agua y aireación de este mismo, son de interés para fijar metales pesados y remediación del suelo debido a su fijación e intercambio de cationes. En las plantas actúan como fertilizantes, su principal causa de actividad bioestimulante es el impacto que tienen en la germinación de semilla, crecimiento, desarrollo y establecimiento de las plantas. En cuestión de los extractos botánicos la atención está en sus propiedades pesticidas, las cuales se le puede dar una oportunidad para que se utilicen con efecto bioestimulante, debido que se tiene pocos conocimientos sobre los efectos bioestimulantes que estos puedan tener.

Quitosano y otros biopolímeros: la aplicación del quitosano en la agricultura se utiliza para la protección de plantas ante patógenos fúngicos, la tolerancia del estrés ambiental y abiótico como la salinidad, sequía y estrés por frío.

Compuestos inorgánicos: el efecto bioestimulante que tienen estos compuestos son la tolerancia al estrés abiótico, influyen en la calidad de los productos vegetales, en la rigidez de la pared celular, la regulación térmica, protección antioxidante, ofrecen protección ante la toxicidad de metales pesados, e influyen en la síntesis y señalización de hormonas vegetales. Las sales inorgánicas aparte de que se utilizan como fungicida, estas influyen también en la homeostasis osmótica del pH y redox, y en las enzimas que están implicadas en respuesta al estrés abiótico.

En diferentes partes del mundo se han estado utilizando los bioestimulantes vegetales en los cultivos agronómicos, esto con un mismo fin y objetivo, el cual es aumentar la eficiencia de la planta en absorción y la asimilación de nutrientes, sin tener un impacto negativo hacia el medio ambiente. Los bioestimulantes se han aplicado con antigüedad en la agricultura, pero el término hasta el día de hoy no tiene una definición definida, pero la aparición del término empezó a aparecer en la década de los noventa, en artículos e investigaciones donde se les mencionaba como bioactivadores agrícolas. En comparación con los agroquímicos los bioestimulantes son más sostenibles ambientalmente, debido que estos están elaborados a base de materiales de desecho, microorganismos y extractos de plantas, así como también son más amigables con la salud humana y el medio ambiente, a diferencia de las hormonas y fitohormona (Rodríguez et al., 2021).

Como bien sabemos los bioestimulantes se realizan a partir de material de desechos naturales, extractos de plantas y algas, así como microorganismos, en una revisión realizada por (Solano Porras et al., 2023), se habla sobre la fermentación en estado sólido la cual se ha reportado como una eco-tecnología, la cual demostró en estudios realizados, en una escala piloto, una exitosa producción de bioestimulantes vegetales, utilizando fuente de carbono para diferentes microorganismos y biomasa vegetal como soporte.

En la actualidad se está buscando a través de estudios y experimentos entender el funcionamiento de los bioestimulantes vegetales, para así poder mejorar la eficacia de los materiales con los que se elaboran y hacer una mejora en la optimización de los procesos industriales que se utilizan para producirlos, debido que es difícil identificar los mecanismos precisos activados por estos mismos, dado a la amplia gama de moléculas contenidas en solución y a la complejidad de los extractos aplicados, los cuáles el producto resultante podrá contener una significativa cantidad de moléculas mal caracterizada, puesto que estos se derivan de un conjunto diverso de materiales biológicos.

### **4.3 Nanopartículas Poliméricas**

La nanotecnología se define se define como la disciplina que estudia el diseño, la manipulación, aplicación de materiales, sistemas funcionales y aparatos, mediante el control, explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala, esta también tiene aplicación en el ámbito de la agricultura, la cual puede cambiar sectores de la misma para proporcionar herramientas novedosas, como lo es la detección de una manera molecular de los diferentes tipos de estrés, la detección rápida de enfermedades patógenas y para el mejoramiento de la absorción de agua, nutrientes y pesticidas de las plantas. En la agricultura ya se aplican los nanosensores y nano productos de sistemas de suministros inteligentes, para combatir patógenos, reducir en un mínimo las pérdidas de nutrientes en la fertilización y mejorar la productividad de los cultivos. De los avances que ha dado la nanotecnología a la agricultura destacan el encapsulamiento de ingredientes activos de fertilizantes, herbicidas, insecticidas, fungicidas y nutrientes, en donde estos se incorporan en matrices de liberación lenta o controlada. Las nanopartículas poliméricas como su nombre lo dice, son partículas que tienen un tamaño inferior a 1  $\mu\text{m}$ , entre 10 y 100 nm, las cuales pueden ser elaboradas a partir de diferentes materiales con distinta naturaleza. Su funcionalidad y efectividad está relacionada en base a su método de elaboración, composición química y en la naturaleza del ligando en dado caso que la tenga (Gomez-Gaete, 2014).

Las nanopartículas han sido muy utilizadas por el área de la medicina, desde la década de los 70, se desarrollaron nanopartículas terapéuticas como medio de liberación de moléculas activas y vacunas. Además de tener aplicación en área de la salud, hoy en día se utilizan también en área de la belleza, automotriz y de la industria de la construcción, en el caso de la agricultura se ha demostrado que la encapsulación de ingredientes activos en nanopartículas aumenta la eficiencia de los ingredientes químicos, debido que esto permite reducir la volatilización, lixiviación, reducir la toxicidad y contaminación de los ecosistemas al utilizar estos nano productos (Cota, Cortez, Burgos, Ezquerro & plas-ciencia, 2013).

Las plantas absorben y translocan a las nanopartículas por diferentes vías, pero el sistema vascular permite que estas se transporten a altas velocidades, estudios científicos sostienen que la penetración de nanopartículas a través de las aperturas de las estomas incrementa la actividad metabólica, logrando que los cultivos tengan un crecimiento y rendimiento de manera mas efectiva que los fertilizantes tradicionales. Al buscar mejorar las vías de absorción y traslocación se encontró a través de varios experimentos que el tamaño de las nanopartículas de 5 nm penetraba con facilidad las estomas de las hojas, las de 20 nm pueden moverse a traves de los plasmodesmos y acuaporinas de manera intercelular. Cuando las nanopartículas son aplicadas de forma en aerosol o aspersion sobre las hojas de las plantas estas pueden penetrar los tejidos vegetales, desplazándose por el floema hacia diferentes tejidos de la planta y penetrando por las estomas, cuando se aplican por medio de riego a las zonas de las raíces las nanopartículas se pueden desplazar por el sistema conductivo de la xilema. En base a algunos resultados se tiene que al aplicar las nanopartículas con la técnica de aerosol o aspersion solo se pierde un 14.7 % en comparación con los productos convencionales, en donde se tiene una perdida de 32. 5% (SALDIVAR, 2018).

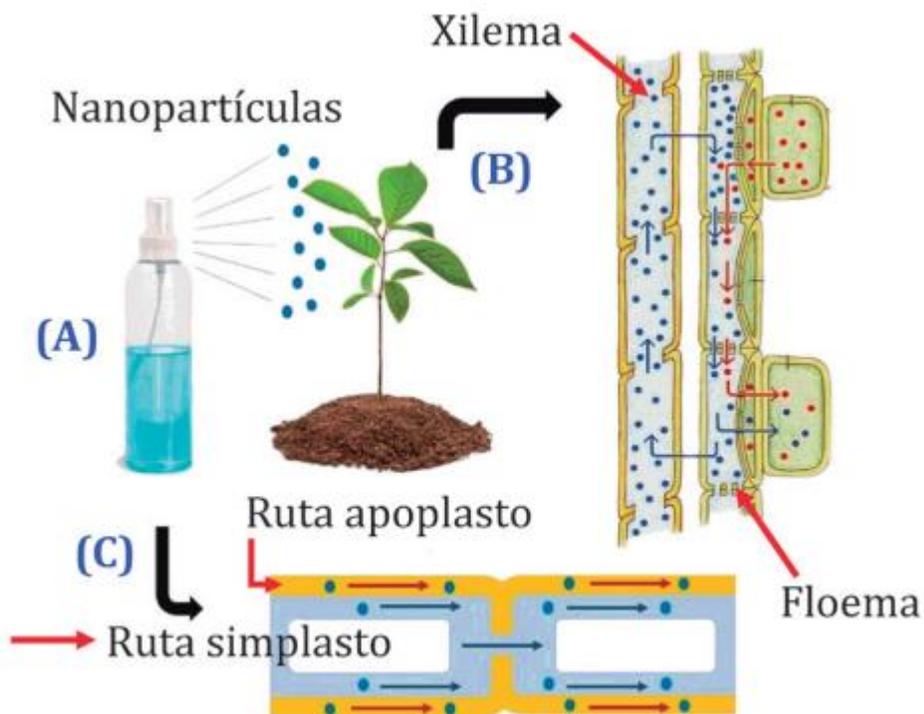


Figura 1. Saldivar et al, (2018). Imagen que ilustra la aplicación de nanopartículas de manera foliar y a través de la raíz, y su traslocación en la planta a través del floema y la xilema.

#### 4.4. YODO

El yodo se ubica en la tabla periódica en el grupo de los halógenos, el cual es un elemento químico, con número atómico 53, y se puede identificar con la letra I, el cual lo conocemos como yodo o iodo, en donde los dos nombres corresponden al mismo elemento. Este es un elemento esencial para la síntesis de las hormonas tiroideas en los humanos, su ingesta se realiza a través de la dieta y en una concentración diaria de 90 a 250 ug. La mayor concentración de este elemento se encuentra en los océanos, es por lo que el pescado, las algas marinas y mariscos tienen una mayor concentración de este elemento en comparación a la concentración que tienen las verduras y frutas, debido que estas son cultivadas en suelos continentales, los cuales carecen de este elemento.

Como se mencionó anteriormente, los suelos carecen de yodo y cultivos que se siembran ahí carecen de una buena concentración de yodo, este en las plantas superiores no se considera como un micronutriente, sin embargo, estudios demuestran

que está involucrado en procesos fisiológicos y bioquímicos. El yodo se encuentra en la tierra de forma orgánica e inorgánica, en el suelo es controlado por la composición de este (textura, pH y condiciones redox), su especiación y movilidad, lo cual puede afectar la absorción de este a través de las raíces de las plantas. En concentraciones bajas resulta beneficioso para las plantas, debido que se han descrito efectos positivos en varios cultivos, por otra parte, de mayor concentración resulta ser toxico e inhibe la absorción a través de las raíces (Gonzali et al., 2017b).

En la atmosfera se encuentra el yodo orgánico e inorgánico de manera gaseoso, pero la absorción de las plantas a través de las hojas es de manera marginal en comparación como lo realiza con la raíz. Se sabe que a niveles bajos el yodo tiene efectos antioxidantes, protectores ante estrés abiótico (Gonzali et al., 2017c). Este podría ser un impulso para buscar múltiples efectos positivos de las aplicaciones del yodo y buscar una solución para que la absorción del yodo sea más o igual a través de las hojas.

#### **4.5 Cultivo de tomate**

El tomate es una hortaliza con gran importancia económica y más cultivada en México, que a través de los años ha ido en aumento su producción y las hectáreas cultivadas, actualmente en México ocupa el numero 10 con 87,918 hectáreas cosechadas y 4, 271,914 toneladas, siendo la principal hortaliza que se exporta. El tomate se cultiva en diferentes zonas y condiciones climáticas y de suelo, sin embargo, en el periodo 2006 y 2016, la agricultura protegida tuvo un aumento de taza promedio anual del 32.2 %, es por ello que representa el 70 % de superficie cultivada de tomate (Orona-Castillo et al., 2022).

## V. MATERIALES Y METODOS

### 5.1 SINTESIS DE NANOPARTÍCULAS

#### 5.1.1 Parte Experimental

En el presente capítulo se describen los materiales, reactivos, así como los equipos necesarios para el desarrollo de la metodología del presente trabajo.

#### 5.1.2 Reactivos y Materiales

Para la polimerización se utilizó como surfactante dodecilsulfato sódico (SDS) 98.5%, como iniciador, 4'-Azobis (4- ácido cianoaléxico) (ACVA) 98%, como agente neutralizante hidróxido de sodio, yodo al 99% como principio activo, el monómero utilizado fue metacrilato de metilo (MMA) 98%. Se utilizó agua ultrapura tipo 1 provista del sistema mili-Q.

Es importante resaltar que todas las sustancias son de grado reactivo y fueron suministradas por Sigma-Aldrich. A excepción del monómero, a los que les fue retirado el inhibidor, el resto de los reactivos se utilizaron tal y como fueron recibidos.

La columna de purificación fue empacada con 4- Terbutil catecol en el laboratorio del departamento de procesos de polimerización de CIQA.

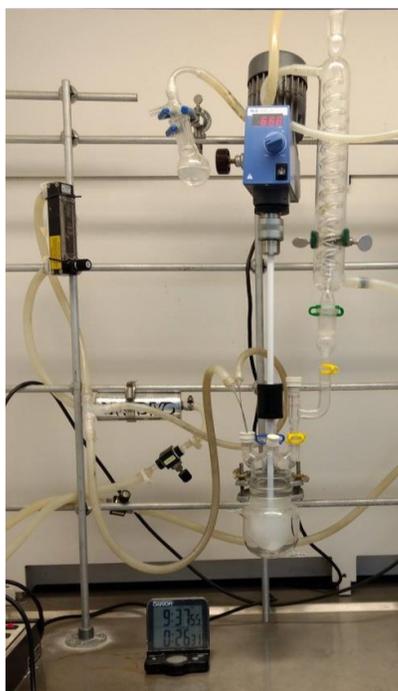
#### 5.1.3 Equipo.

##### Reacciones de copolimerización.

Para llevar a cabo las reacciones de copolimerización se utilizó un reactor de vidrio de 100 mL encaquetado con tapa de 4 bocas. En una de las bocas se suministró argón de ultra alta pureza suministrado por INFRA, en otra boca se conectó un condensador de reflujo, en la tercera boca se llevó a cabo la dosificación de los reactivos y en la

boca central se colocó un adaptador en el cual se insertó una varilla de teflón con una propela en forma de medialuna.

Para mantener una agitación constante en el sistema, se conectó un motor mecánico (IKA laboratechnik) con indicador digital a una velocidad de 250 rpm. La temperatura se mantuvo constante (80 °C) a través de un baño de circulación (POLYSCIENCE). Para la dosificación se utilizó una jeringa de 20 cc con manguera (Máster Flex). Se empleó una bomba de infusión (KdsScientific).



*Figura 2. Sistema de reacción utilizado para llevar a cabo la síntesis de nanopartículas caradas con yodo en un solo paso.*

#### 5.1.4 Purificación de monómero.

Inicialmente, se empaco una columna con 4-ter Butilcatecol, reactivo utilizado para retirar la HQ que sirve como inhibidor; haciendo pasar el monómero por la columna. Se mantienen en refrigeración, hasta su uso.

#### 5.1.5 Síntesis de nanopartículas.

Se pesarán 60g de agua, los cuales fueron colocados en un reactor de vidrio de 250 mL de capacidad, la cual fue vigorosamente burbujeado con argón durante 30 minutos. Después de ese lapso, la temperatura del reactor se establece en 80 °C y la agitación en 250 rpm. Bajo esas condiciones de agitación y calentamiento, y con flujo constante de argón se agrega al reactor una solución de SDS (29.25 mg) diluido en agua (5 mL), seguida de una solución de yodo (96 mg) en MMA (7 g). Finalmente, se agrega una solución de ACVA (168.3 mg) neutralizada con una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH, 48 mg, agua 10 g) y la polimerización procedió bajo atmosfera de argón en ausencia de luz durante 8 horas.

(Macromolecules 2007, 40, 6076-6081. Living Radical ab Initio Emulsion Polymerization of n-Butyl Acrylate by Reverse Iodine Transfer Polymerization (RITP): Use of Persulfate as Both Initiator and Oxidant. Jeff Tonnar, Patrick Lacroix-Desmazes, \* and Bernard Boutevin)

Se realizaron dos polimerizaciones las cuales se describen a continuación en la tabla 1:

**Tabla 1. Descripción de las dos reacciones**

REACTIVO	PESO R1	*PESO R2*
Agua	60.0028 g	60.0030 g
SDS	29.96 mg	33.20 mg
NaOH	48.10 mg	48.09 mg
ACVA	169.8 mg	170.0 mg
YODO	112.5 mg	112.3 mg
MMA	7.56 gr	7.52 gr

## **5.2 Caracterización de nanopartículas**

### **5.2.1 Determinación por gravimetría de % de conversión de reacción y % sólidos.**

La conversión fue determinada por gravimetría, esta técnica nos permite conocer la cantidad de sólidos contenidos en el látex. Una vez conocida esta cantidad se puede determinar la conversión de monómero a polímero.

Para realizar esta determinación al finalizar la reacción, se tomaron alícuotas las cuales fueron colocadas en un vial que contenía una solución de hidroquinona al 4%, estos viales fueron llevados a una estufa a temperatura de 60 °C hasta llegar a peso constante; logrando evaporar agua y monómeros residuales. Este método analítico cuantitativo consiste en separar y pesar un elemento o compuesto de composición química conocida. Esta sustancia debe obtenerse en el mayor estado de pureza posible y debe encontrarse en una relación estequiométrica definida con el elemento o compuesto que se desea determinar. Los resultados se calculan a partir de la medida de la masa de la sustancia separada.

### **5.2.2 Determinación por DLS.**

La dispersión de luz dinámica es una técnica que se puede utilizar para medir las características físicas de las partículas en solución por debajo del intervalo de tamaño del micrón, normalmente en el intervalo de 10 a 100 nm. La DLS implica enviar un haz de luz láser a través de la solución de muestra y monitorizar los fotones dispersos en ángulos específicos durante intervalos de tiempo cortos (microsegundos).

Para la determinación de tamaño de partícula se prepararon diluciones que contenían 0.03 g de látex en 2 g de agua y se analizaron en el dispersor de Luz Malvern modelo Zeta Sizer Nano-S90.

### **5.2.3 Resonancia magnética nuclear ( $^1\text{H}$ NMR)**

La espectroscopia por resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica analítica utilizada para determinar la estructura molecular y la composición química de una muestra. Actúa analizando la interacción de los núcleos que giran en un fuerte campo magnético. En la espectroscopia mediante RMN, un campo magnético externo estacionario hace que ciertos núcleos de una molécula absorban radiofrecuencias selectivas. La energía absorbida induce una transición en los espines nucleares, que se observa en un espectro de RMN.

La estructura química de la nanopartícula polimérica obtenida se estudió por  $^1\text{H}$  NMR, el análisis se llevó a cabo en un espectrómetro de resonancia magnética nuclear marca Bruker de 400 MHz. La adquisición y el manejo de los datos se realizaron mediante el software TopSpin (versión 3.62) y MestReC respectivamente. La muestra fue disuelta en dimetilsulfóxido deuterado (DMSO- $d_6$ ) y colocada en tubos de cuarzo de 5 mm de diámetro, para posteriormente ser analizada a temperatura ambiente.

### **5.2.4 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, también conocida como análisis FTIR o espectroscopia FTIR, es una técnica analítica que se utiliza para identificar materiales orgánicos, polímeros y en algunos casos inorgánicos. El método de análisis FTIR utiliza luz infrarroja para escanear muestras de prueba y observar propiedades químicas.

Para el análisis por espectroscopia de infrarrojo (FTIR) se utilizó el equipo Nicole Is10 modelo Thermo Fisher Scientific. La toma de los datos se realizó con una escala de absorbancia desde 4000 hasta 600  $\text{cm}^{-1}$  del espectro electromagnético. Usando un detector DTGS KBr. Para procesar los espectros se utilizó el programa OMNIC. Los análisis se realizaron por duplicado.

### **5.2.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

La morfología de la nanopartícula polimérica se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo GOL MODEL GCM600.

## **5.3 Efecto de bioestimulación vegetal de las nanopartículas funcionalizadas con yodo en plántulas de tomate.**

### **5.3.1 Ubicación del experimento**

Este experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo capilla de mediana tecnología, con medida de 14m de largo por 7 m de ancho ubicado en el departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila, México ubicado a 25° 21' 12.8" latitud norte y 101° 01' 51.9" longitud oeste.

### **5.3.2 Tratamientos**

En una charola de poliestireno de 200 cavidades, conteniendo peat most y perlita con una proporción 1:1, se sembraron semillas de tomate variedad Rio Grande el 21 de marzo de 2023. Fueron colocadas en un invernadero de mediana tecnología hasta tener 4 hojas verdaderas, se trasplantaron el 21 de abril de 2023 a macetas de 1lt. Se le aplicaron 5 tratamientos: T1, T2, T3, T4, T5 y un testigo como se muestra en la tabla 2, con 10 repeticiones cada uno. Por aspersión foliar iniciando cinco días después del trasplante, aplicándose una vez por semana los martes, por cinco semanas.

**Tabla 2. Tratamientos utilizados**

T1	10 ppm NP funcionalizada con yodo
T2	50 ppm NP I funcionalizada con yodo
T3	100 ppm NP I funcionalizada con yodo

T4	NP sin yodo
T5	Control
T6	100 ppm KI

Las plantas se regaban y nutrían diariamente con 100 ml de solución Steiner al 25 % de forma manual con un pH de 6.3 y con una conductividad eléctrica de 2 dS/m.

**Tabla 3. Concentraciones de la solución nutritiva según (Steiner, 1961)**

Macronutrientes	Miliequivalentes (Meq)
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	9
$\text{KNO}_3$	12
$\text{K}_2\text{SO}_4$	7
Micronutrientes	Partes por millón (ppm)
$\text{HBO}_3$	0.5
$\text{MnSO}_4$	0.7
$\text{ZnSO}_4$	0.009
$\text{CuSO}_4$	0.02
Fe quelado	3

### 5.3.3 Diseño experimental

Este se realizó con diseño experimental completamente aleatorizado de cinco tratamientos y 10 repeticiones por tratamientos, siendo una unidad experimental una plántula de tomate.

### 5.3.4 Muestreo

El muestreo se realizó completamente al azar a las cinco semanas posteriores del trasplante, en donde se tomaron cinco repeticiones por tratamiento. De manera no destructiva se midió el número de folíolos, la altura, el diámetro del tallo y el peso fresco. Finalmente se cuantificó el peso seco.

### **5.3.5 Medición de variables de crecimiento**

VARIABLES DE CRECIMIENTO EVALUADAS:

- Número de folíolos

El número de folíolos se cuantificó contando cada lámina foliar dentro de la hoja compuesta.

- Altura

Se midió con cinta métrica flexible desde la base del tallo hasta el ápice.

- Diámetro del tallo

Se tomó mediante el uso de un vernier manual empezando a medir sobre la base del tallo.

Peso fresco y seco de todas las variables

- Peso Fresco y Seco

Las plantas fueron divididas en tallo, raíz y hojas y se pesaron utilizando una balanza digital, registrando el peso fresco. Posteriormente se colocarán en un horno de secado por 76 horas a una temperatura de 760°C para luego pesarse y registrar nuevamente el peso seco expresado en gramos.

## **VI. RESULTADOS**

## 6.1 Síntesis y caracterización de nanopartículas

La caracterización de la síntesis de nanopartículas de PMMA/Yodo, arrojó los siguientes resultados, con los cuales tomamos la decisión de utilizar la reacción #2 denominada "R2" para llevar a cabo los experimentos en campo ya que fue la RXN que obtuvo mejores resultados.

Las conversiones obtenidas por gravimetría fueron entre el 70 y el 95% por lo que se podría decir que el método empleado para la síntesis de estas Np permite obtener altas conversiones.

Los resultados se incluyen en la tabla 4.

**Tabla 4. Tamaño del diámetro de la nanopartícula en las dos reacciones.**

<b>Parámetros</b>	<b>Rx1</b>	<b>*Rx2</b>
<b>% Conversión</b>	71	95
<b>% Sólidos</b>	7.5	9.5
<b>% de Yodo</b>	1.23	2.65
<b>Diámetros</b>	163 nm	63.85 nm

## 6.2 Diámetro de partícula.

Del látex preparado en la reacción dos (R2) se prepararon diluciones que contenían 0.03 g de látex y se diluyeron en 2 g de agua filtrada por el sistema miliq; se analizaron

en un dispersor de Luz Marca Malvern modelo Zeta Sizer Nano-S90. La medición se llevó a cabo en un ángulo de 90° a temperatura ambiente.

La figura dos, nos muestra el histograma con el diámetro de partícula obtenido donde podemos observar que tenemos una sola población de partículas, lo cual nos indica que no tenemos contaminación y el rango de todas las partículas es menor a 100 nm.

	Size (d.nm):	% Number:	St Dev (d.nm):
<b>Z-Average (d.nm):</b> 90.25	<b>Peak 1:</b> 63.85	100.0	17.96
<b>Pdl:</b> 0.127	<b>Peak 2:</b> 0.000	0.0	0.000
<b>Intercept:</b> 0.901	<b>Peak 3:</b> 0.000	0.0	0.000

**Result quality :** Good

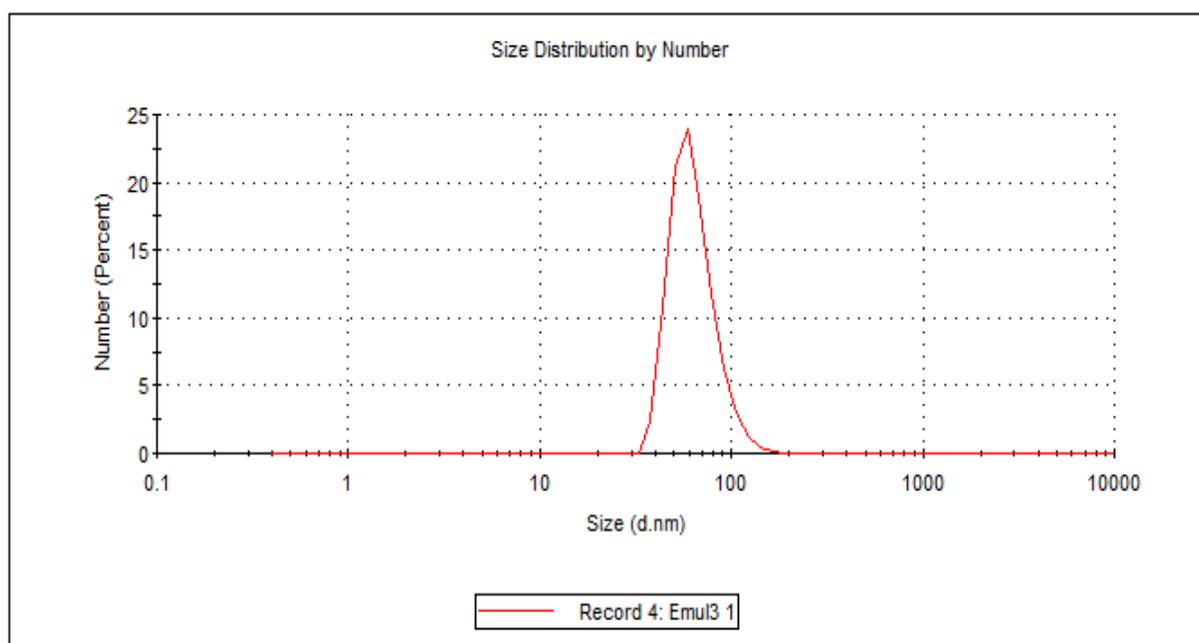


Figura 2. Histograma de dn, obtenido por DLS.

### 6.3 Resonancia magnética nuclear de protón ( $^1\text{H}$ NMR)

El latex producto de la reacción de polimerización (PMMA yodado) fue dializado y secado (eliminación de agua) para ser analizado por las técnicas de  $^1\text{H}$ -RMN, GPC y FTIR. El análisis de  $^1\text{H}$ -RMN fue llevado a cabo de la siguiente manera: aproximadamente 20 mg de la muestra seca fueron disueltos en 0.5 mL de cloroformo deuterado, y la solución resultante fue colocada en un tubo de cuarzo especial para este tipo de análisis. El equipo utilizado fue un espectrómetro de RMN de marca Bruker 400 MHz. Las condiciones de análisis fueron 16 scans y temperatura ambiente.

En la figura Z se muestra el espectro de  $^1\text{H}$ -RMN del PMMA yodado, en el cual se realizan las asignaciones de cada señal con el grupo químico al que pertenecen dichas señales, de acuerdo con la estructura química también mostrada en la Figura Z. Las señales de los grupos metilenos ( $-\text{CH}_2-$ ) de la cadena principal hidrocarbonada del PMMA se aprecian a un desplazamiento químico de aproximadamente 1.9 ppm, estos grupos fueron identificados con la asignación "b". Las señales de los grupos metilos ( $-\text{CH}_3$ ) de la cadena principal hidrocarbonada del PMMA se aprecian a un desplazamiento químico de aproximadamente 0.9 ppm, estos grupos fueron identificados con la asignación "a". Las señales de los grupos metoxi ( $-\text{O}-\text{CH}_3$ ) de los grupos laterales a la cadena principal hidrocarbonada del PMMA se aprecian a un desplazamiento químico de aproximadamente 3.6 ppm, estos grupos fueron identificados con la asignación "c".

Las señales que indican la presencia de átomos de yodo en los extremos de las cadenas del PMMA son las identificadas como "d + e" y que son observadas en el espectro como una pequeña señal en aproximadamente 2.5 ppm. Directamente el elemento yodo no se puede observar en este tipo de análisis, por lo que se analizan los grupos químicos con vecindad a uno, dos o hasta tres enlaces de distancia. Por eso, la señal de en 2.5 ppm se atribuye a los protones del  $-\text{CH}_2-$  y del  $-\text{CH}_3$  que se encuentran en la última unidad monomérica incorporada a la cadena del PMMA antes del átomo de yodo terminal.

La señal en 2.5 ppm se aprecia muy pequeña en comparación con el resto de las señales porque solamente se trata de un grupo  $-\text{CH}_2-$  y un grupo  $-\text{CH}_3$  vecinos a dos

enlaces con el átomo de yodo, en comparación con cientos o miles de grupos  $-\text{CH}_2-$  y  $-\text{CH}_3$  de toda la cadena del PMMA.

El espectro mostrado en este trabajo coincide con un par de publicaciones previas, donde reportan el análisis de PMMA yodados a partir de análisis de  $^1\text{H}$ -RMN.

Con este análisis se demuestra la presencia de Yodo en el PMMA.

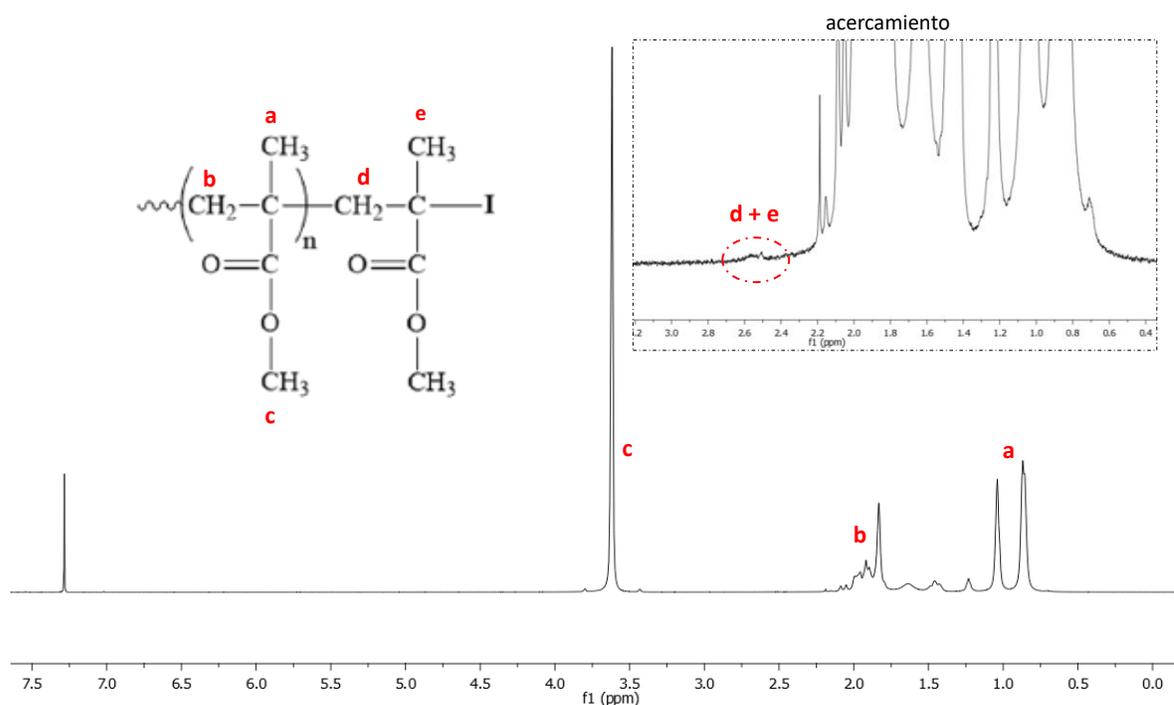


Figura 3. Espectro de  $^1\text{H}$ -RMN del PMMA yodado.

#### 6.4 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

El látex producto de la reacción de polimerización (PMMA yodado) fue dializado y secado por liofilización para ser analizado por FTIR.

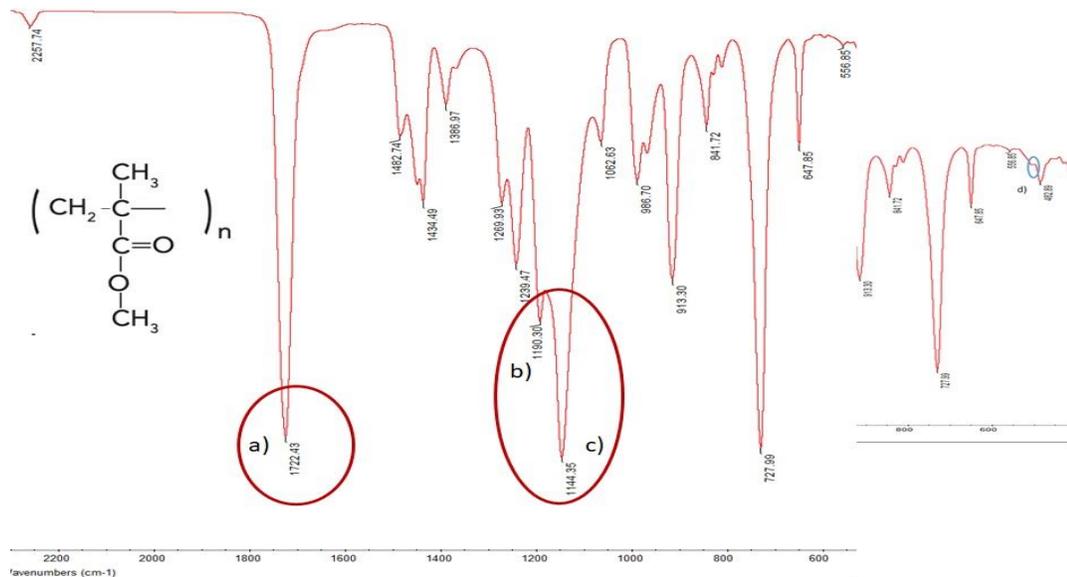
El análisis de IR fue llevado a cabo de la siguiente manera: una muestra sólida de aproximadamente 30 mg se mezcló con bromuro de potasio (KBr) transparente al IR y se compactó en una pastilla. El equipo utilizado fue un Espectrómetro Infrarrojo Thermo Scientific iS50 acoplado a un ATR con cristal de diamante, con 25 barridos y resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$ . La muestra fue tratada a temperatura ambiente

En la figura 3, se muestra el espectro de IR PMMA yodado, en el cual aparecen las señales con el grupo al que pertenecen dichas señales de acuerdo con la estructura química del PMMA que tiene un grupo éster y dos CH<sub>3</sub>.

Las señales principales en este espectro son, el éster (1). Específicamente, el denominado a) C=O en 1722 cm<sup>-1</sup>, el denominado b) C-C-O en 1190 cm<sup>-1</sup> y el O-C-C está en 1144 cm<sup>-1</sup> denominado c).

Las señales que indican la presencia de yodo en los extremos de las cadenas del PMMA son las identificadas como d) y que son observadas en el espectro como una pequeña señal en 500 cm<sup>-1</sup>.

Con este análisis se demuestra la presencia de Yodo en el PMMA.



**Figura 3.** Espectro de FTIR de PMMA yodado

El látex producto de la reacción de polimerización (PMMA yodado) fue dializado y secado por liofilización para ser analizado por FTIR.

El análisis de IR fue llevado a cabo de la siguiente manera: una muestra sólida de aproximadamente 30 mg se mezcló con bromuro de potasio (KBr) transparente al IR y se compactó en una pastilla. El equipo utilizado fue un Espectrómetro Infrarrojo Thermo Scientific iS50 acoplado a un ATR con cristal de diamante, con 25 barridos y resolución de 4 cm<sup>-1</sup>. La muestra fue tratada a temperatura ambiente.

En la figura 3, se muestra el espectro de IR PMMA yodado, en el cual aparecen las señales con el grupo al que pertenecen dichas señales de acuerdo con la estructura química del PMMA que tiene un grupo éster y dos CH<sub>3</sub>

Las señales principales en este espectro son, el éster (1). Específicamente, el denominado a) C=O en 1722 cm<sup>-1</sup>, el denominado b) C-C-O en 1190 cm<sup>-1</sup> y el O-C-C está en 1144 cm<sup>-1</sup> denominado c).

Las señales que indican la presencia de yodo en los extremos de las cadenas del PMMA son las identificadas como d) y que son observadas en el espectro como una pequeña señal en 500cm<sup>-1</sup>.

Con este análisis se demuestra la presencia de Yodo en el PMMA.

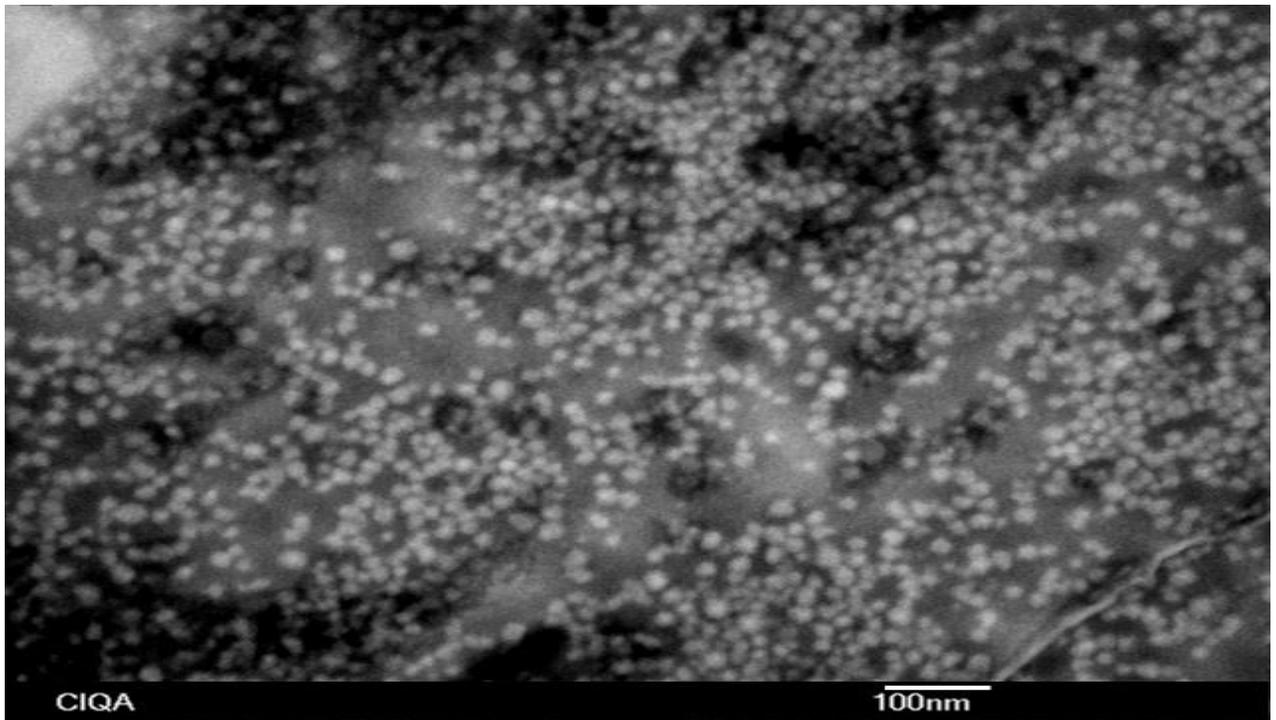
## **6.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

La morfología de las nanopartículas poliméricas de PMMA se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo GOL MODEL GCM600.

Se preparó una dilución del látex obtenido con 2mg de la muestra diluida en 2 gr de agua filtrada con el sistema miliq, se ultrasónico por 60 segundos y una gota de esta solución se agregó sobre una rejilla de cobre hasta llevar a sequedad, después fue teñida con una solución de tetroxido de osmio al 1 % para tener una mejor resolución.

Las cuales presentaron un tamaño homogéneo, de morfología circular, estas evidencian un tamaño menor de 100 nm.

\*Cabe aclarar que esta micrografía es de un látex de pmma sin funcionalizar, la muestra funcionalizada aún no ha sido analizado\*

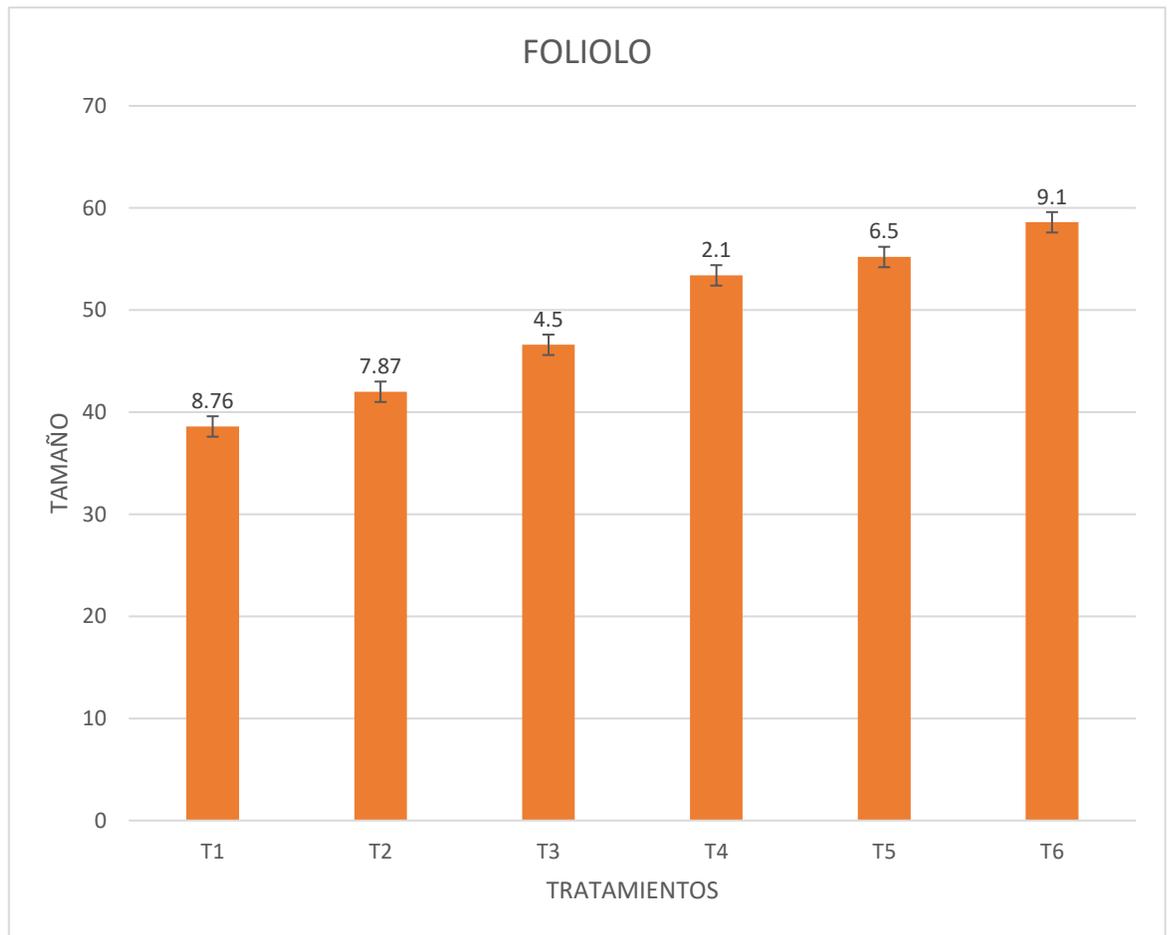


*Figura 3. Microscopia SEM de la nanopartícula de PMMA.*

## **6.5 Medición del efecto de bioestimulación**

### **6.5.1 Número de folíolos**

Tras la aplicación de todas las concentraciones de las nanopartículas (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm) se obtuvo un efecto reductor del 23 % en el número de folíolos en comparación con el testigo absoluto y el yoduro de potasio como se puede ver en la siguiente grafica.



*Figura 4. La siguiente grafica muestra el número de foliolo en los diferentes tratamientos.*

### **6.5.2 Altura**

En esta variable se pudo observar una reducción de aproximadamente un 20 % en comparación con el testigo absoluto, el yoduro de potasio y la concentración de 100 ppm.

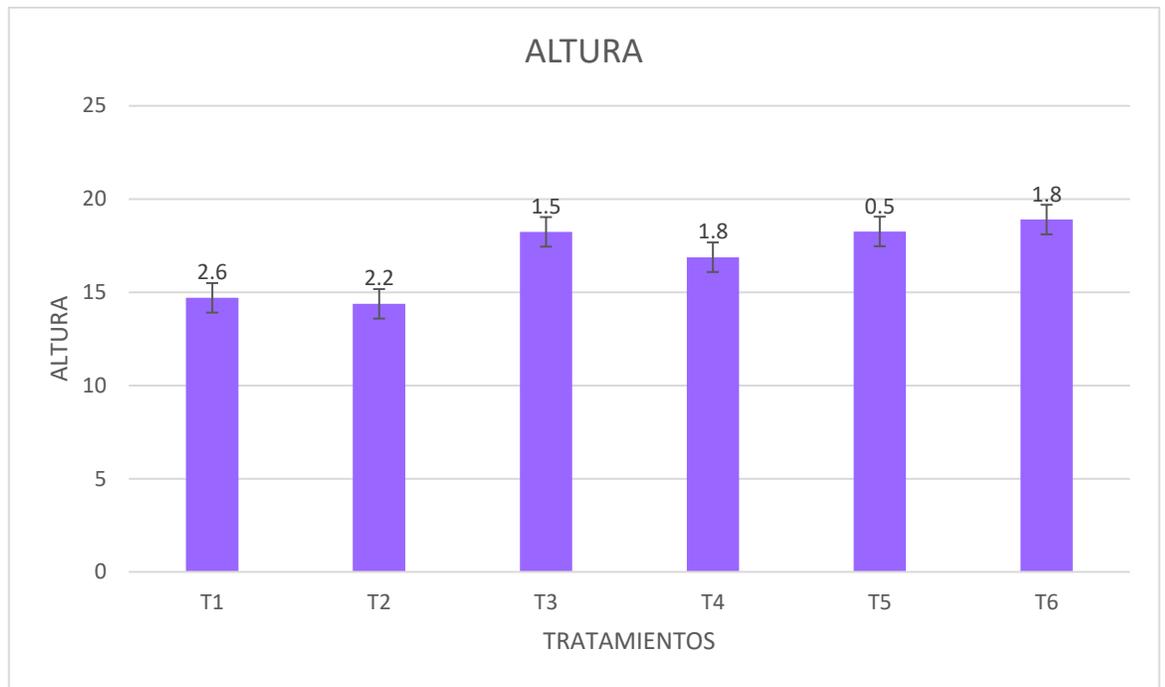


Figura 5. Gráfico de la altura de las plántulas.

### 6.5.3 Diámetro del tallo

En esta variable, se puede observar en la gráfica que los tratamientos tuvieron un efecto positivo en cuestión del grosor del tallo, en comparación con el testigo absoluto. Debido que el grosor del tallo disminuyó en el T5 al igual que en la nanopartícula sin yodo.

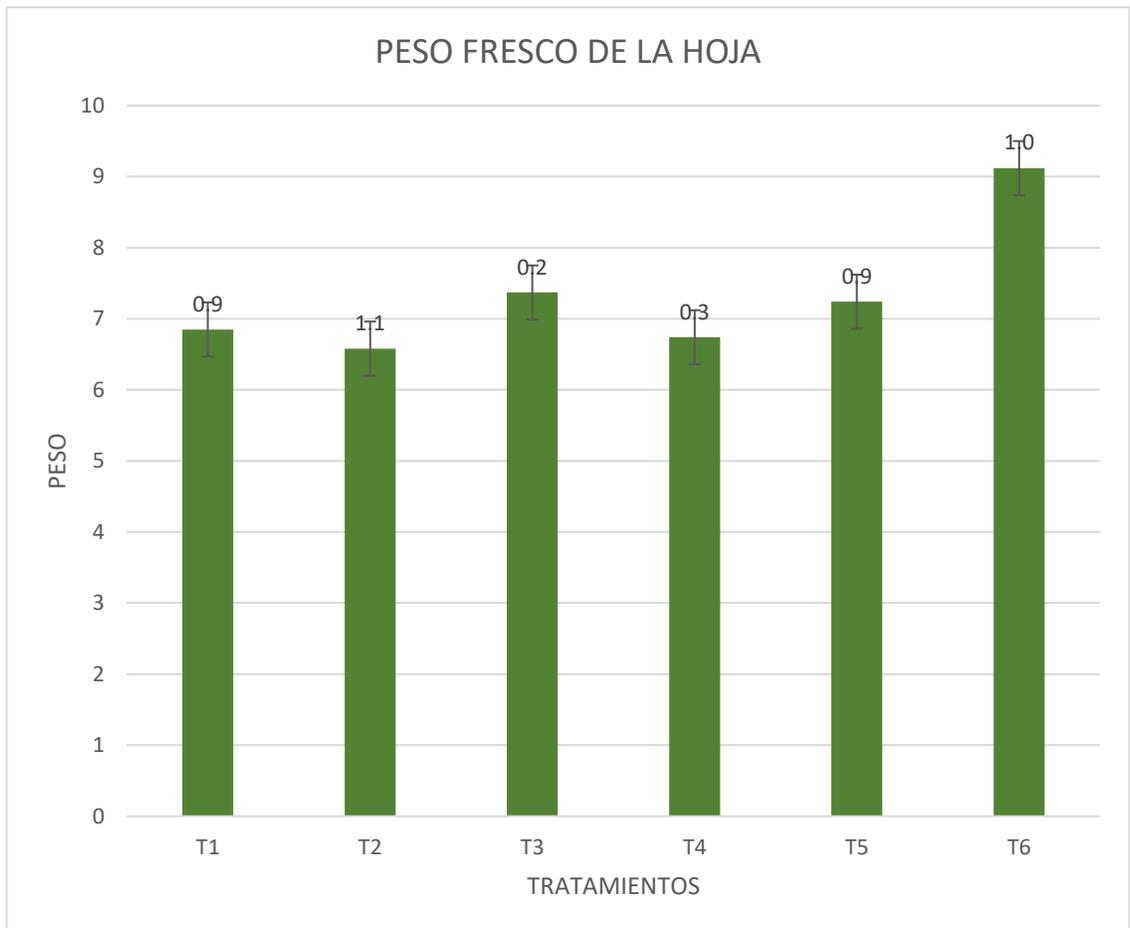


Figura 6. En la siguiente Gráfico se concentran los resultados del tamaño del diámetro del tallo.

## 6.6 Peso fresco y seco de todas las variables

### 6.6.1 Peso fresco de la hoja

En la siguiente grafica podemos observar que todas las literales son iguales por ende no hubo un cambio en los tratamientos en cuestión del peso seco de la hoja.



*Figura 7. En este Gráfico se puede observar que los tratamientos no tuvieron diferencias significativas con los distintos tratamientos.*

### 6.6.2 Peso seco de la hoja

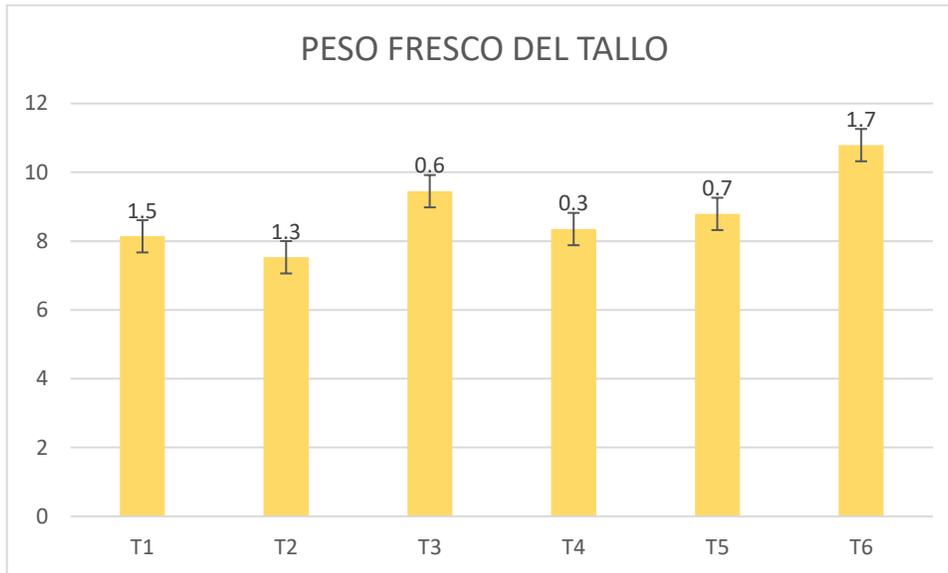
En esta variable, hubo una disminución del 18% del peso seco de la hoja en comparación con el testigo absoluto, el yoduro de potasio y la nanopartícula a una concentración de 100 ppm.



Figura 8. En el gráfico se muestra que con los tratamientos 1 y 2, los cuales son las concentraciones más bajas de la nanopartícula, hubo una reducción en el peso seco de la hoja.

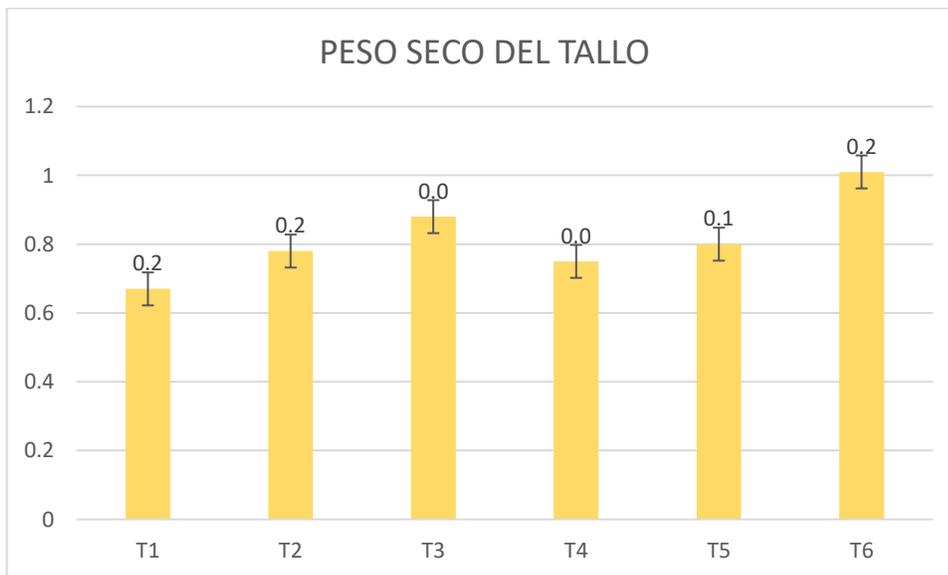
### 6.6.3 Peso fresco del tallo

En el caso de la variable del peso fresco del tallo este disminuyó en un 80% en comparación con el yoduro de potasio, la concentración de 100 ppm y el testigo absoluto.



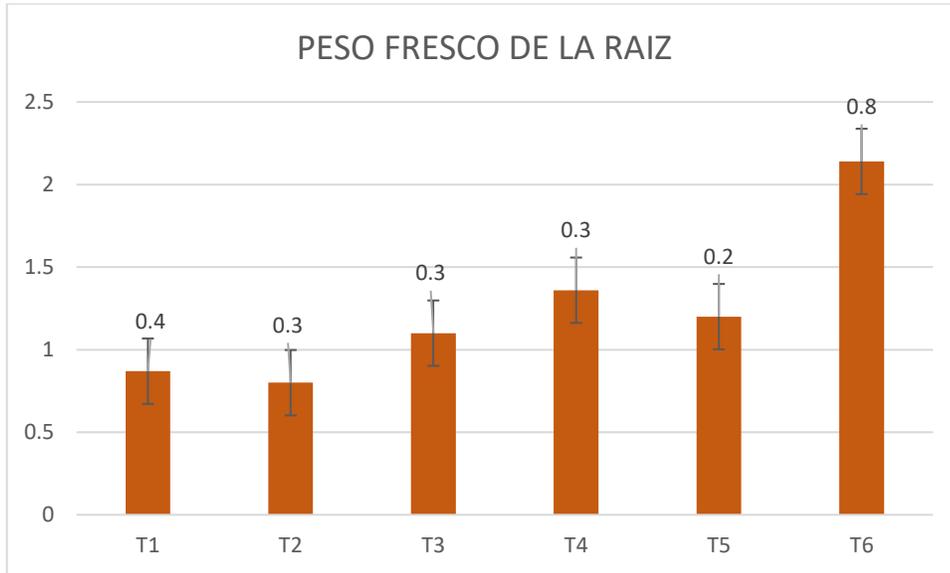
### 6.6.4 Peso seco del tallo

En este caso comparando las otras variables con el testigo absoluto, la concentración de 100 ppm y el testigo absoluto se puede observar en la gráfica una disminución del 15%.



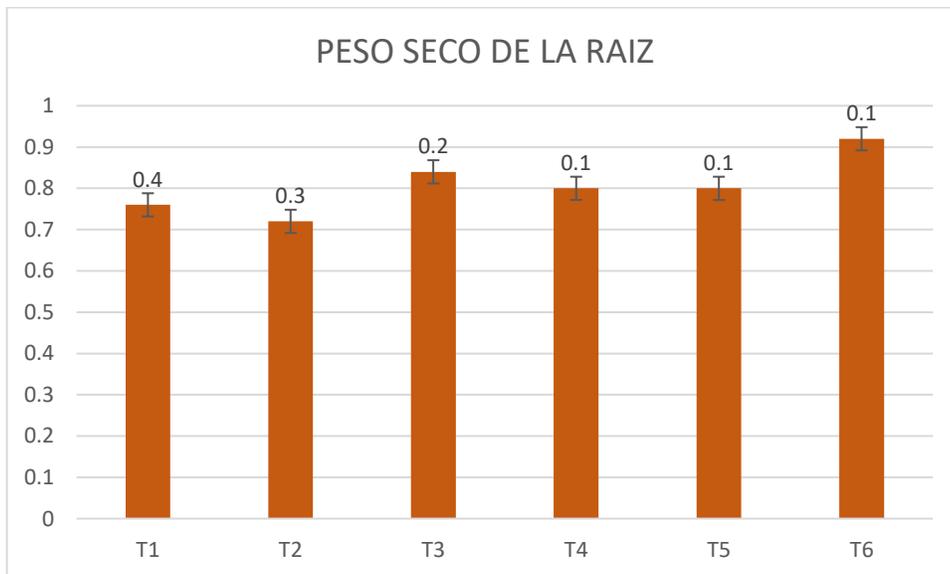
### 6.6.5 Peso fresco de la raíz

En esta variable se puede apreciar una disminución del 80% en comparación con el yoduro de potasio, como se observa en la gráfica de barras.



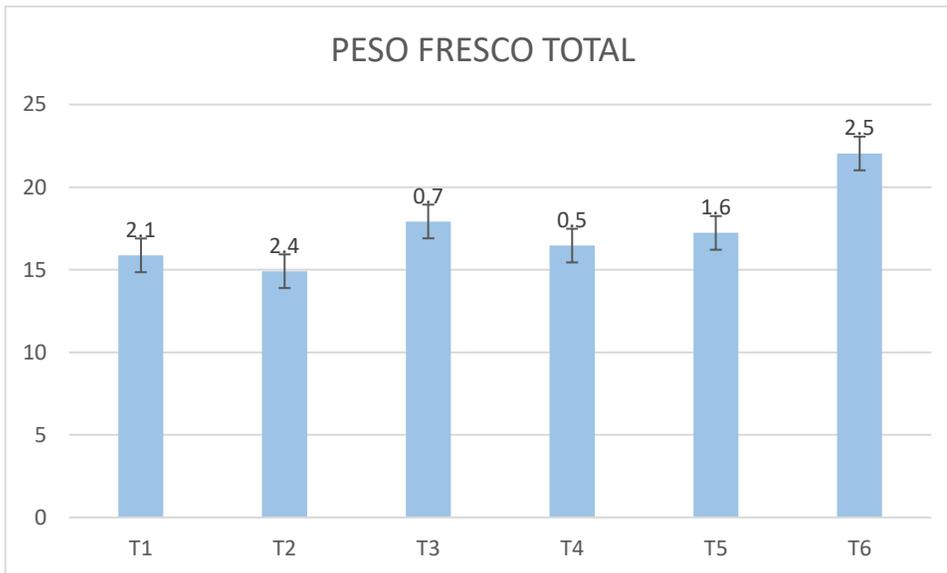
### 6.6.6 Peso seco de la raíz

En esta variable se puede apreciar una disminución del 15% en comparación de la concentración de 100 ppm y el yoduro de potasio.



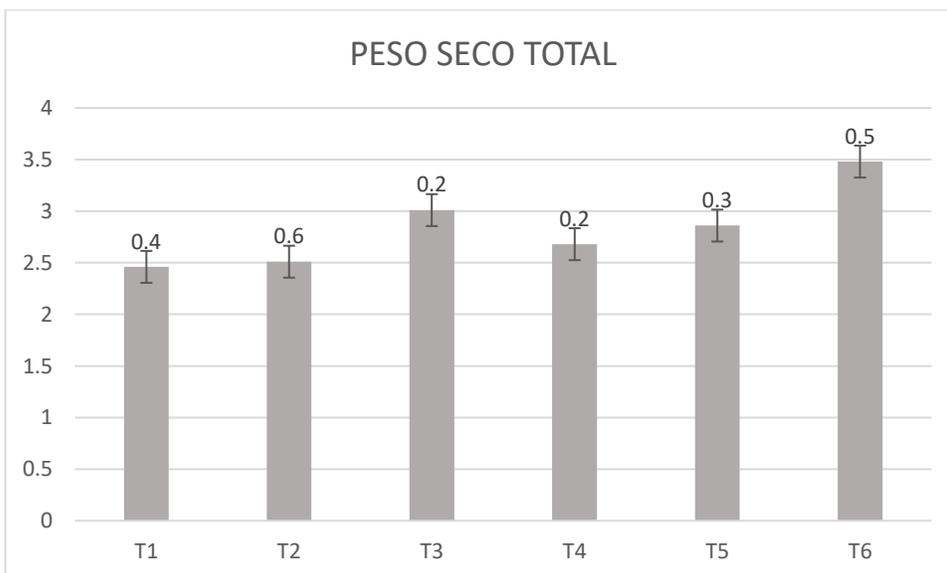
### 6.6.7 PESO FRESCO TOTAL

En esta variable se puede observar en la grafica que el IK en comparación con el tratamiento 2 (nanopartícula funcionalizada con yodo en la concentración de 50 partes por millón) se puede observar una diferencia mínima en el peso fresco total.



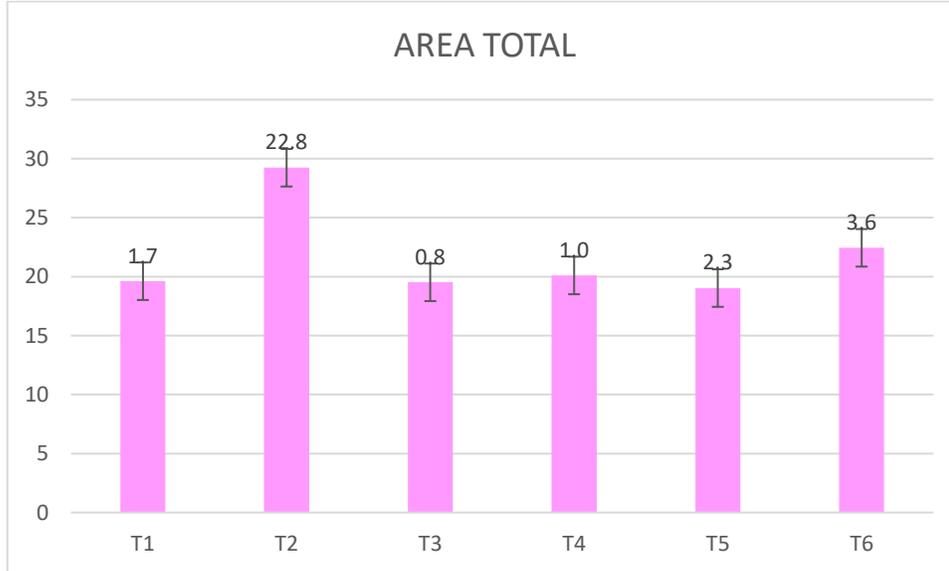
### 6.6.8 PESO SECO TOTAL

En esta variable el tratamiento seis con el tratamiento 2 se puede observar una mínima diferencia en comparación con el tratamiento 3 de la nanopartícula funcionalizada con yodo a 100 partes por millón.



### 6.6.9 AREA TOTAL

En el área total se puede observar que el tratamiento dos obtuvo una mayor área total en comparación con los otros tratamientos y el testigo.



El compendio (media y prueba de medias de cada variable por tratamiento) de todos los datos de crecimiento encontrados, se muestran en la siguiente Tabla 5.

**TABLA 5, COMENDIO DE RESULTADOS DE VARIABLES DE CRECIMIENTO EN PLANTÚLAS DE TOMATE CON APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS FUNCIONALIZADAS CON YODO.**

TRAT	HOJA	FOLIOLOS	DT	ALTURA	PFH	PSH
<b>NP 10 PPM</b>	5.8 a	38.6 a	6.2 b	14.7 ab	7 a	1 a
<b>NP 50 PPM</b>	6.4 a	42 a	6.2 b	14.38 a	7 a	1 a
<b>NP 100 PPM</b>	6.2 a	46.6 a b	6 b	18.24 c	7 a	1 ab
<b>NP SIN YODO</b>	8 a	53.4 bc	5.6 ab	16.88 bc	7 a	1 a
<b>CONTROL</b>	10.8 b	55.2 bc	5 a	18.26 c	7 a	1 ab
<b>100 PPM KI</b>	11.8 b	58.6 c	6 b	18.9 c	9 b	2 b

TRAT	PFT	PST	PFR	PSR	PFTOT	PSTOT	, ÁREA T
<b>NP 10 PPM</b>	8.14 ab	0.67 a	0.9 a	0.76 a	15.87 ab	2.46 a	19.61 a
<b>NP 50 PPM</b>	7.53 a	0.78 ab	0.8 a	0.72 a	14.91 a	2.51 ab	29.23 a
<b>NP 100 PPM</b>	9.45 bc	0.88 bc	1.1 a	0.84 a	17.92 b	3.01 bc	19.52 a
<b>NP SIN YODO</b>	8.35 ab	0.75 ab	1.4 a	0.8 a	16.46 ab	2.68 ab	20.1 a
<b>CONTROL</b>	8.79 ab	0.8 ab	1.2 a	0.8 a	17.23 ab	2.86 ab	19.03 a
<b>100 PPM KI</b>	10.79 c	1.01 c	2.1 b	0.92 a	22.04 c	3.48 c	22.44 a

## VIII. DISCUSIÓN

El yodo en las plantas es considerado como no esencial, sin embargo, en diferentes estudios este ha demostrado resultados positivos, relacionados con el aumento de la tolerancia al estrés oxidativo, así como también se ha encontrado que el yodo incrementa la cantidad de antioxidantes, el tomate es un cultivo hortícola el cual evidencia que es una especie capaz de tolerar grandes cantidades de yodo, acumulándolo en el fruto (Macías et al., 2024). Es por lo que se decidió utilizar este tipo de cultivo en este experimento para evaluar su efecto de la nanopartícula funcionalizada con yodo en el crecimiento.

En el ámbito de la agricultura el yodo ha tenido varias aplicaciones estas con diferentes objetivos, los cuales son evaluar el efecto que tiene en el crecimiento, en la biofortificación, así como el efecto que este tiene ante un tipo de estrés como lo es el salino, en las plantas de diferentes cultivares. Varios experimentos indican que en bajas concentraciones este es benéfico, y a altas concentraciones este podría volverse tóxico si se aplica de manera foliar, debido que este se concentra en grandes cantidades en las hojas, lo que provoca una reducción de la expansión de la hoja y en la actividad fotosintética (Salas & Sabdiel, 2019).

En un estudio realizado en *Arabidopsis thaliana* el yodo también tuvo efecto positivo en las plantas, al aumentar la biomasa y al anticipar la floración, este tuvo presente en la raíz y el brote, ayudó en la modulación de la expresión de los genes que están implicados en la respuesta de la defensa.

El yodo puede ser absorbido por las plantas desde la solución del suelo a través de las raíces, por medio de los estomas y cutículas, a través del aire, la lluvia o disuelto en soluciones salinas, pero la absorción más eficiente para suministrar yodo a las plantas es a través de sistemas hidropónicos y por aplicaciones al suelo, en comparación con las pulverizaciones foliares (Nascimento et al., 2022). Aunado a esto a pesar de que sean muy eficientes esas formas que ya mencioné anteriormente influyen otros factores que pueden hacer que el yodo no se absorba correctamente y

en las cantidades deseadas, debido que se puede volatilizar cuando se aplica de manera foliar o su absorción es muy marginal a través de las hojas, cuando se aplica al suelo se puede lixiviar debido a las propiedades de este, que influyen mucho en la absorción. Es por lo que se buscó una alternativa para que el yodo pueda ser absorbido de manera más eficiente y sin que este se volatilice o se pierda por las propiedades del suelo (Gonzali et al., 2017a).

Las nanopartículas son las más estudiadas del mundo de los nanomateriales, debido a su eficiencia y facilidad de producción a partir de una gran variedad de materiales. Estas tienen una identidad sintética la cual la componen su tamaño, composición y el tipo de molécula que tenga en su superficie, esta identidad es determinada dependiendo del método de síntesis utilizado, depende de esto, también las características que esta posea. Las nanopartículas también pueden sintetizarse por medios biológicos, de extractos de plantas, hongos, bacterias e incluso virus. Este método probablemente sea el más rápido y está libre de desechos químicos (Sánchez-Valdés et al., 2024). En la agricultura las nanopartículas ofrecen una producción mejorada mediante diversas estrategias utilizando menores insumos de energía y reduciendo los costos de producción y desperdicios agroquímicos. Los diferentes tipos de nanopartículas ya sean poliméricas, metálicas o inorgánicas, aumentan productividad y buscan aplicaciones para el perfeccionamiento de nanosistemas inteligentes para la captura e inmovilización de nutrientes y su liberación gradual en el suelo o de manera foliar, para aumentar la eficiencia de los nutrientes, al reducir al mínimo la lixiviación y volatilización, al mismo tiempo mejorando la absorción de nutrientes de las plantas. Una de las aplicaciones que más destacan en la agricultura es la elaboración de nano pesticidas encapsulados para una liberación controlada y la producción de micro y macro nutrientes a nivel nano (Lira Saldivar et al., 2018). Por lo tanto, por todos estos beneficios que tienen las nanopartículas se decidió inmovilizar al yodo, para aprovecharlo sin que este se volatilice o se lixivie, al encapsularlo en una nanopartícula polimérica.

En el artículo “Agro nanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna” menciona que el efecto promotor o inhibidor de las nanopartículas en las plantas se debe a la concentración y las propiedades inherentes del elemento que se esté utilizando. La toxicidad de las nanopartículas se atribuye a dos acciones, una a la toxicidad química en base a los iones tóxicos liberados y la segunda al estrés causado por la superficie y el tamaño o forma de la nanopartícula. En un experimento realizado con diferentes tamaños de nanopartículas se obtuvo que la germinación y crecimiento de las plántulas disminuyó paulatinamente con los diferentes aumentos de tamaño y concentración de las nanopartículas (SALDIVAR, 2018). En base a esto, se buscó un tamaño adecuado para la nanopartícula, para que esta pudiera ser absorbida y traslocada a la planta a través de las hojas de las plántulas de tomate.

## IX. CONCLUSIÓN

1. Se lograron sintetizar las nanopartículas de PMMA funcionalizadas con yodo.
2. Se logro obtener el diámetro deseado de las nanopartículas PMMA/ yodo para poder ser aplicadas a nivel agrícola.
3. Al ser aplicadas a diferentes concentraciones de (10, 50 y 100 ppm) estas evidenciaron una disminución en el número de hojas y no se pudo obtener un efecto bioestimulante, sin embargo, al aplicar el yoduro de potasio, si se obtuvo un efecto bioestimulante en las plántulas de tomate.
4. Al ser un experimento realizado por primera vez, aunque los resultados no fueron tan satisfactorios, estos pueden servir de impulso para seguir estudiando las nanopartículas poliméricas con aplicación en la agricultura.

## X. BIBLIOGRAFÍA

Gomez-Gaete, C. (2014). Nanopartículas poliméricas: Tecnología y aplicaciones farmacéuticas. *Rev. Farmacol. Chile*, 7(2), 7-16.

Gonzali, S., Kiferle, C., & Perata, P. (2017a). Iodine biofortification of crops: Agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current opinion in biotechnology*, 44, 16-26.

Gonzali, S., Kiferle, C., & Perata, P. (2017b). Iodine biofortification of crops: Agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current opinion in biotechnology*, 44, 16-26.

Gonzali, S., Kiferle, C., & Perata, P. (2017c). Iodine biofortification of crops: Agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current Opinión in Biotechnology*, 44, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004>

Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Vera Reyes, I., & De los Santos Villarreal, G. (2018). Agro nanotecnología: Una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 50(2), 395-411.

Macías, J. M., Ortiz, W. N., Martínez, D. Q., Mendoza, A. B., & Martínez, P. L. (2024). Respuesta de la aplicación del yodo sobre antioxidantes, contenido mineral y crecimiento en frutos de tomate. *Revista Politécnica de Aguascalientes*, 3.

Nascimento, V. L., Souza, B. C., Lopez, G., & Guilherme, L. R. (2022). On the role of iodine in plants: A commentary on benefits of this element. *Frontiers in Plant Science*, 13, 836835.

Ochoa, C. Y. (2018). Agricultura periurbana: Revisión crítica de los riesgos y desafíos en la actual agenda política de las interacciones agro-urbanas. *Biblio3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*.

Orona-Castillo, I., Del-Toro-Sánchez, C. L., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Espinoza-Arellano, J., 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.

Rodríguez, Y. S., Martínez, J. A., & Cruz, A. G. (2021). Los bioestimulantes. Una alternativa para el desarrollo agroecológico cubano. *Eco vida: Revista científica sobre diversidad biológica y su gestión integrada*, 11(3), 225-249.

Salas, P., & Sabdiel, A. (2019). *Uso del Yodo (I) como inductor a la tolerancia al estrés por salinidad en plántulas de tomate (Lycopersicum esculentum) Var. Rio Grande.*

SALDIVAR, R. H. L. (2018). *Potencial de la nanotecnología en la agricultura sustentable.*

Sánchez-Valdés, S., Rodríguez-González, J. A., Sánchez-Martínez, A. C., Bustos, K., Cruz, M. V., Martínez, L. C., Torres-González, J., & Ramírez-Barrón, S. N. (2024). Tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 6(11), 20-39.

Solano Porras, R. C., Artola, A., Barrena, R., Ghoreishi, G., Ballardo Matos, C., & Sánchez, A. (2023). Breaking New Ground: Exploring the Promising Role of Solid-State Fermentation in Harnessing Natural Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Processes*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/pr11082300>