

## Short Note [Nota Corta]



## Impacto del nanocompuesto quitosano-yodato de potasio en el crecimiento de plántulas de calabacita y efecto fungistático en *Podosphaera xanthii* †

### [Impact of chitosan-potassium iodate nanocomposite on the growth of zucchini seedlings and fungistatic effect on *Podosphaera xanthii*]

Nazario Francisco-Francisco<sup>1</sup>, Jorge Francisco León-De la Rocha<sup>1</sup>  
and Hortensia Ortega-Ortiz<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Agricultura Sustentable y Protegida, Universidad Tecnológica de Tehuacán. Prolongación de la 1 Sur No. 1101, San Pablo Tepetzingo, Tehuacán, Puebla, México, C.P. 75859, Email: [nazariof.francisco@uttehuacan.edu.mx](mailto:nazariof.francisco@uttehuacan.edu.mx), [jorge.leon@uttehuacan.edu.mx](mailto:jorge.leon@uttehuacan.edu.mx)

<sup>2</sup>Departamento de Materiales Avanzados, Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna 140, Saltillo, Coahuila, México, C.P. 25250, México. Email: [hortensia.ortega@ciga.edu.mx](mailto:hortensia.ortega@ciga.edu.mx)

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background:** Chitosan nanoparticles (NPsCS) and potassium iodate (KIO<sub>3</sub>) currently show biostimulation and bioprotection benefits in agricultural crops; however, there are few plant species and pathogens in which chitosan-iodate nanocomposite (NPsCS-KIO<sub>3</sub>) have been evaluated. **Objective:** To evaluate low concentrations of NPsCS-KIO<sub>3</sub> dispersions in the growth of zucchini (*Cucurbita pepo* L.) seedlings and the control of powdery mildew (*Podosphaera xanthii*). **Methodology:** Applications of serial dilutions of 10<sup>-1</sup>, 10<sup>-2</sup>, and 10<sup>-3</sup> of the NPs-KIO<sub>3</sub>, NPsCS, and KIO<sub>3</sub> treatments were carried out on the cotyledons of the seedlings under a completely randomized design. The results were processed with ANOVA and means tests were performed (Tukey,  $p = 0.05$ ). **Results:** It was found that treatment with NPsCS-KIO<sub>3</sub> at 10<sup>-1</sup> (2.5 mg L<sup>-1</sup>) was the most effective in reducing the area under the disease progress curve (AUDPC) and stimulated the formation of leaves with a statistical difference from day 34 after its application. **Implications:** The results of this work contribute to the evidence of the biostimulant effect of NPsCS-KIO<sub>3</sub> in the foliar development of zucchini plants and *in vivo* fungistatic effect at low concentrations. **Conclusion:** The application of nanocomposite NPsCS-KIO<sub>3</sub> at a concentration of 2.5 mg L<sup>-1</sup> stimulates zucchini plant growth and promotes a fungistatic *in vivo* effect on *P. xanthii* compared to individual applications of NPsCS and KIO<sub>3</sub>.

**Key words:** disease severity; conidial germination; root weight.

#### RESUMEN

**Antecedentes:** Las nanopartículas de quitosano (NPsCS) y yodato de potasio (KIO<sub>3</sub>) registran en la actualidad beneficios de bioestimulación y bioprotección en los cultivos agrícolas; sin embargo, son pocas las especies vegetales y los patógenos en los cuales han sido evaluados como nanocompuesto de quitosano-yodato (NPsCS-KIO<sub>3</sub>). **Objetivo:** Evaluar concentraciones bajas de dispersiones de NPsCS-KIO<sub>3</sub> en el crecimiento de plántulas de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) y el control de la cenicilla (*Podosphaera xanthii*). **Metodología:** Se realizaron aplicaciones de diluciones seriadas a 10<sup>-1</sup>, 10<sup>-2</sup>, y 10<sup>-3</sup> de los tratamientos NPsCS, KIO<sub>3</sub>, y NPsCS-KIO<sub>3</sub> sobre los cotiledones de las plántulas bajo un diseño completamente al azar. Los resultados fueron procesados con ANOVA y se realizaron pruebas de medias (Tukey,  $p = 0.05$ ). **Resultados:** Se encontró que el tratamiento con NPsCS-KIO<sub>3</sub> a 10<sup>-1</sup> (2.5 mg L<sup>-1</sup>) fue el más efectivo en la reducción del área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) y estimuló la formación de hojas con diferencia estadística a partir del día 34 después de su aplicación. **Implicaciones:** Los resultados de este trabajo

† Submitted April 12, 2025 – Accepted October 9, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6285>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = N. Francisco-Francisco: <http://orcid.org/0000-0001-5367-1631>; J.F. León-De la Rocha: <http://orcid.org/0000-0001-7063-8382>; H. Ortega-Ortiz: <https://orcid.org/0000-0002-8869-6385>

contribuyen a la evidencia del efecto estimulante de las NPsCS-KIO<sub>3</sub> en el desarrollo foliar de plántulas de calabacita y el efecto fungistático *in vivo* sobre *P. xanthii* a bajas concentraciones. **Conclusión:** La aplicación del nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> a una concentración de 2.5 mg L<sup>-1</sup> estimula el crecimiento vegetal de calabacita y promueve un efecto fungistático *in vivo* sobre *P. xanthii* en comparación a aplicaciones individuales como NPsCS y KIO<sub>3</sub>.

**Palabras clave:** severidad de la enfermedad; germinación de conidios; peso radicular.

## INTRODUCCIÓN

La nanotecnología (NT) es considerada la quinta tecnología revolucionaria de los últimos 100 años, después de la biotecnología. En la última década, esta tecnología ha propiciado el desarrollo de nuevos pesticidas e insumos con potencial para sustituir productos convencionales en la agricultura (Usman *et al.*, 2020). En este contexto, las nanopartículas (NPs) metálicas como Ag, Cu, Fe, y ZnO han mostrado eficacia antimicrobiana y estimulante en diversos cultivos agrícolas (Chavali y Nikolova, 2019; Singh *et al.*, 2021). Su alta reactividad, derivada del aumento en el área superficial, es lo que le confiere propiedades útiles con los diversos sistemas biológicos, incluidas las plantas (Khan *et al.*, 2019). Entre las propiedades más destacadas de las NPs en la producción agrícola se encuentran la estimulación del crecimiento y la protección frente a factores de estrés biótico y abiótico (González-Morales *et al.*, 2022). Se ha reportado que este efecto protector puede estar relacionado con la activación de la vía fenilpropanoide, responsable de la producción de metabolitos fenólicos involucrados en la resistencia sistémica inducida (El-Saadony *et al.*, 2022).

En los últimos años se ha incrementado el interés por las NPs de origen polimérico debido a su biodegradabilidad, bajo costo y compatibilidad ambiental (Elmowafy *et al.*, 2023). Entre estos, el quitosano destaca por su uso como portador versátil de principios activos o pesticidas sintéticos y como agente activo en sí mismo (Jiang *et al.*, 2022; Niculescu y Grumezescu, 2022). Estudios recientes han demostrado que la combinación de quitosano con yodato de potasio en forma de nanocompuestos a bajas concentraciones estimula el crecimiento vegetal. Rivera Solís *et al.* (2024), reportaron que la aplicación de nanoquitosano-yodato incrementó el vigor de plántulas de tomate. Treviño-Ruiz *et al.* (2024), observaron un aumento en el rendimiento del cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero. Kiferle *et al.* (2019), registraron que el quitosano, al ser combinado con agentes oxidantes como el yodato, mejora el contenido fenólico de las plantas, lo cual puede contribuir a reducir la severidad de enfermedades causadas por fitopatógenos.

*Podosphaera xanthii* es uno de los fitopatógenos policíclicos más problemáticos en la producción de cucurbitáceas, es el agente causal de la cenicienta, una enfermedad foliar que afecta severamente la

fotosíntesis y reduce el rendimiento. Su control se ha basado principalmente en el uso de fungicidas sistémicos, sin embargo, su uso irracional ha propiciado la aparición de cepas resistentes (Zhang *et al.*, 2021; McGragh, 2001; Fernández-Orduño *et al.*, 2006). Ante esta situación, se ha incrementado el interés por estrategias de control más sostenibles, como el uso de compuestos naturales (aceites esenciales, extractos botánicos) y sustancias bioactivas con propiedades elicitoras y antifúngicas (Dhifi *et al.*, 2016; El-Saadony *et al.*, 2022). Dentro de estas opciones emergentes, los nanomateriales de base biopolimérica, como el quitosano unido con agentes oxidantes, han mostrado efectos duales como bioestimulantes y supresores del desarrollo de fitopatógenos (González-Morales *et al.*, 2022). No obstante, aún es limitada la información disponible sobre el efecto dual a bajas concentraciones de los nanomateriales, donde además de estimular el crecimiento vegetal, puedan ofrecer un control mínimo contra los fitopatógenos. Por tanto, este estudio evaluó la eficacia del nanocompuesto quitosano-yodato de potasio (NPsCS-KIO<sub>3</sub>) en el desarrollo de plántulas de calabacita y su efecto fungistático frente a *P. xanthii* bajo condiciones de invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Síntesis de nanopartículas de quitosano y del nanocompuesto de quitosano-yodato de potasio

La síntesis de nanopartículas de quitosano (NPsCS) y el nanocompuesto de nanopartículas de quitosano con sales de yodato de potasio se llevaron a cabo en los laboratorios del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) mediante el método de gelación iónica. La síntesis de las NPsCS se realizó a partir de un litro de una solución al 0.5 % (p/v) de quitosano comercial marca Golden Shell con peso molecular de 420,000 g/mol y un grado de desacetilación del 84 % al 0.5 % (p/v) en ácido acético marca Fermont® al 1 % (v/v) y como agente de entrecruzamiento el tripolifosfato de sodio (TPP) de la marca Sigma-Aldrich al 1 % (p/v) en una relación 10:3 (v/v) de las cuales se obtuvieron 1.866 g de NPsCS para un rendimiento del 28.71 %. Para la síntesis del nanocompuesto de quitosano-yodato (NPsCS-KIO<sub>3</sub>) en otra reacción aparte, después de formadas las NPsCS se agregaron por goteo 240 ml de una solución acuosa de yodato de potasio (KIO<sub>3</sub>) marca Fermont® al 0.1 M para finalmente obtener 2.08 g del nanocompuesto, lo que corresponde a un rendimiento

del 32% (Ortega-Ortiz *et al.*, 2022). Por microscopía electrónica de barrido (SEM) se observó que las NPsCS y el nanocompuesto yodado presentaron forma semiesférica. El tamaño de partículas determinado por DLS (difracción de luz dinámica) para las NPsCS fue de 90-200 nm y el nanocompuesto presentó partículas de 80 a 200 nm. Por espectroscopía de inducción por plasma (ICP) se constató que cada gramo del NPsCS-KIO<sub>3</sub> contenía 25 mg de KIO<sub>3</sub>.

### Preparación de los tratamientos y condiciones de inoculación

Se contó con un total de 10 tratamientos los cuales fueron: tres diluciones de yodato de potasio (KIO<sub>3</sub>) (10<sup>-1</sup>, 10<sup>-2</sup>, y 10<sup>-3</sup>), tres diluciones de las nanopartículas de quitosano (NPsCS), tres diluciones del nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub>, y un tratamiento control, el cual consistió en la aplicación de agua desionizada. Las soluciones stock de yodato (KIO<sub>3</sub>) marca Fermont® se prepararon a una concentración de 25 mg L<sup>-1</sup> en agua desionizada y con las diluciones seriadas se obtuvieron concentraciones finales de 2.5, 0.25, y 0.025 mg L<sup>-1</sup>. Las mismas diluciones seriadas de las NPsCS y del nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> partieron de una preparación de 1 g L<sup>-1</sup> para así obtener concentraciones de 0.1, 0.01, y 0,001 g L<sup>-1</sup>. El contenido de KIO<sub>3</sub> presente en el nanocompuesto fue equiparable al contenido en la solución de solo yodato. El tratamiento testigo consistió en agua desionizada.

Para los bioensayos, se sembraron semillas de *Cucurbita pepo* L. (variedad Andrea tipo gray Zucchini, WS-8091, Westar Seeds International Inc.) en tierra preparada (Nutrigarden®) en recipientes térmicos de 296 ml. Durante el experimento la temperatura en el interior del invernadero se registró entre 19 a 35 °C. Los riegos se aplicaron diariamente con agua de pozo (CE de 2.1 dS/m y pH de 7.35) dirigido al sustrato hasta la germinación. La inoculación con *Podosphaera xanthi* se realizó cuando las plantas alcanzaron 15 días de crecimiento y la cual se efectuó con la colocación de un fragmento de tejido infectado (5 mm<sup>2</sup>) en las hojas cotiledonares con la ayuda de una aguja. Las hojas infectadas con cenicilla provinieron de plantas adultas de calabacita colectadas en el valle de Tehuacán, Puebla. El patógeno fue previamente identificado por De la Rocha *et al.* (2020). Nueve días después de la inoculación, se eliminó el ápice de todas las plántulas para uniformizar las mediciones. Esta decisión se tomó ya que las hojas cotiledonares ofrecen una superficie completamente desarrollada y uniforme, lo que favorece una infección más homogénea. Asimismo, con la eliminación del ápice se evitó la variabilidad en el desarrollo de hojas verdaderas entre plántulas, lo cual permitió una evaluación más precisa. Las aplicaciones de los diez tratamientos se realizaron con atomizadores manuales de 20 ml y se efectuó con diez pulsaciones por hoja

cotiledonar para garantizar un mojado uniforme. Las aplicaciones se repitieron dos veces con intervalos de siete días.

### Evaluación del efecto fungistático *in vivo*

La severidad de la enfermedad se determinó mediante la observación directa a las hojas cotiledonares de seis plantas por tratamiento y con ello la asignación de un porcentaje de afectación. Para disminuir errores de interpretación visual, los porcentajes fueron transformados a la escala Horsfall-Barrat (1945), la cual permite agrupar rangos de porcentaje a un valor específico (1=0 %, 2=0-3 %, 3=3-6 %, 4=6-12 %, 5=12-25 %, 6=25-50 %, 7=50-75 %, 8=75-88 %, 9=88-94 %, 10=94-97 %, 11=97-100 %, 12=100 %) y con ello se calculó el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad mediante la fórmula de Campbell y Madden (1990):

$$ABCPE = \sum_{1}^{n-1} (y_1 + y_{1+1}) / 2 \times (t_{1+1} - t_1)$$

donde *n* es el número de evaluaciones, *y* la severidad y *t* el tiempo en días. La tasa de infección aparente se estimó mediante la fórmula  $\ln(x/(1-x))$ , y se determinó el coeficiente de determinación lineal (*R*<sup>2</sup>).

### Evaluación del efecto fungistático en la germinación de conidios

Debido al registro de mayor significancia estadística en la severidad de la enfermedad entre los tratamientos solo con la concentración 10<sup>-1</sup>, se tomó la decisión de solo seguir evaluando esta concentración en la germinación de conidios. Para su determinación se tomó como base los criterios de observación de conidios de cenicilla de Gastélum *et al.* (2005) y Bojórquez *et al.* (2012), con modificaciones. Brevemente, en el laboratorio fueron aplicados los tratamientos a los cotiledones con los atomizadores con tres pulsaciones. Una vez humedecidos los cotiledones, fueron colectados una masa de conidios con la punta de una aguja para insulina y colocados en una gota de agua sobre portaobjetos y posteriormente fueron colocados al microscopio de luz para ser observados a 40x de aumento. La cantidad inicial de conidios tratados se tomó como base 100 % en relación a los conidios que germinaron en las 24, 48 y 72 horas posteriores. La fórmula empleada fue la siguiente:

$$\% \text{ Germinación} = \frac{(\text{Número de conidios germinados} \times 100)}{\text{Total de conidios tratados}}$$

## Evaluación del efecto estimulante

En una segunda fase del experimento, se evaluó el efecto estimulante de los tratamientos  $\text{KIO}_3$ , NPsCS, NPsCS- $\text{KIO}_3$ , y el testigo en el crecimiento de las plántulas. Para ello, fueron sembradas semillas de calabacita en cinco charolas de 200 cavidades con turba de musgo humedecido con 1 L de la solución de cada tratamiento a una concentración de  $10^{-1}$ ; el testigo fue el sustrato humedecido con agua desionizada. Cada conjunto de sustrato tratado fue dividido en cinco porciones iguales las cuales fueron colocadas en secciones de 50 cavidades seleccionadas aleatoriamente dentro de cada charola, de manera que cada charola incluyó una repetición de cada uno de los cuatro tratamientos. La concentración seleccionada se determinó con base en ensayos preliminares que mostraron fitotoxicidad a concentraciones mayores y ausencia de respuesta a concentraciones menores. El porcentaje de germinación se evaluó cinco días después de la siembra (dds) el cual se determinó con el conteo de semillas con radícula y cotiledón emergidos por bloque de cada charola. La variable biomasa fresca y seca radicular se determinó en plántulas con quince días de crecimiento en una balanza analítica (Olympus Corp., Tokyo, Japón). Para ello, en cada bloque correspondiente a cada repetición de los tratamientos fueron colectadas al azar cinco plántulas a las cuales se les retiró la plúmula con un bisturí. Una vez registrado el peso fresco, fueron colocadas en papel aluminio para obtener el peso seco constante en un horno de secado por convección (Wisd, DAIHAN Scientific, Seoul, Korea del Sur). Posterior a la determinación de dicha variable, las plántulas restantes de cada charola fueron trasplantadas a macetas de polietileno negro con cinco L de capacidad a las cuales se les aplicó riegos diarios con agua de pozo. El efecto de los tratamientos en el número de hojas se registró a los 20, 27, 34, 41, y 48

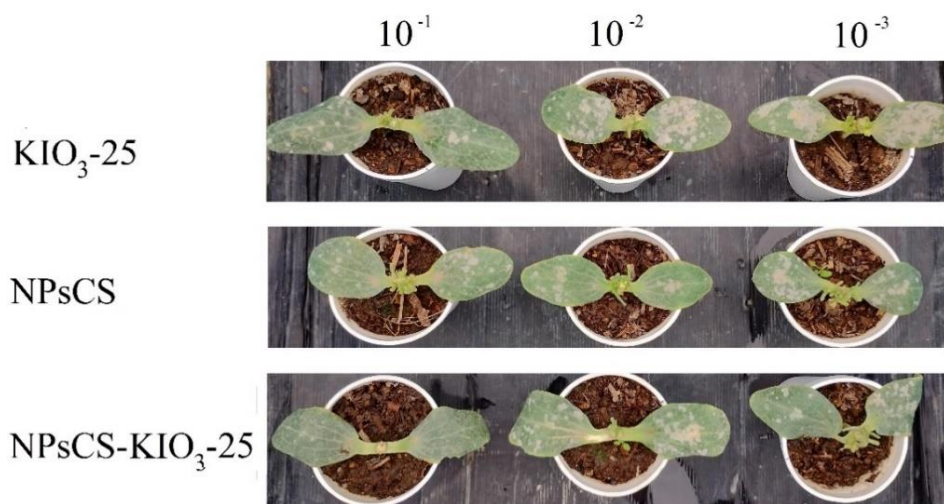
días después de siembra y se determinó de cinco plantas seleccionadas al azar.

## Diseño experimental

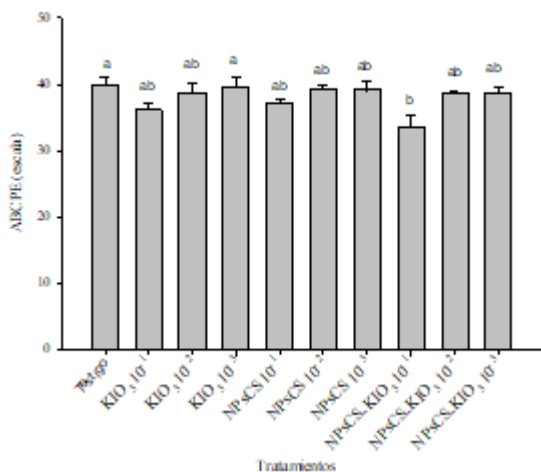
Los experimentos se realizaron bajo un diseño completamente al azar en invernadero. La evaluación del efecto fungicida contó con diez tratamientos con seis repeticiones, teniendo como unidad experimental una hoja cotiledonar. La evaluación de la germinación y estimulación del crecimiento radicular y número de hojas formadas se realizó con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y se realizaron pruebas de medias con Tukey ( $P \leq 0.05$ ), así también se obtuvo el error estándar del conjunto de datos de cada tratamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observaron diferencias notables entre los tratamientos con las tres concentraciones de aplicación (Figura 1). El análisis del Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) presentó diferencia estadística significativa (Valor  $P = 0.0338$ ) entre los tratamientos aplicados a las plántulas de calabacita (Figura 2). El nanocompuesto quitosano-yodato de potasio (NPsCS- $\text{KIO}_3$ ) a la concentración  $10^{-1}$  ( $2.5 \text{ mg L}^{-1}$ ) redujo el ABCPE en 15.5 % en comparación con el tratamiento testigo. En contraste, las aplicaciones individuales de  $\text{KIO}_3$  y NPsCS a la misma concentración presentaron reducciones de 9 % y 6.5 %, respectivamente. Este resultado sugirió un efecto fungistático aditivo contra *Podosphaera xanthii* cuando se aplica el nanocompuesto NPsCS- $\text{KIO}_3$  en comparación con las aplicaciones por separado. Las diluciones  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  presentaron reducciones menores a 3 %.



**Figura 1.** Plántulas de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) sin ápice tomadas al azar con los diferentes tratamientos a las dosis  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  contra *Podosphaera xanthii* ocho días después de la primera aplicación.

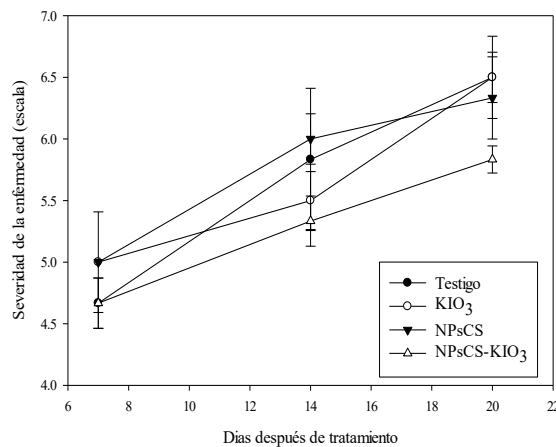


**Figura 2. Avance final de la enfermedad registrada en los tratamientos aplicados a diferentes concentraciones en plántulas de calabacita con cenicilla. ABCPE: Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad calculada con las medias de los valores de severidad expresada en la escala de Horsfall-Barrat. Medias con la misma literal entre los tratamientos no son diferentes estadísticamente de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), valor  $P = 0.0338$ . Las barras representan el error estándar ( $n = 6$ ).**

La tabla 1 presenta las tasas de infección aparente y los coeficientes de determinación lineal correspondientes a los diferentes tratamientos. Se observó que el nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> a la concentración 10<sup>-1</sup> registró la menor tasa de infección aparente en comparación al testigo. Los tratamientos con KIO<sub>3</sub> y NPsCS mostraron valores equiparables. Estos resultados sugieren que el nanocompuesto disminuyó la velocidad de infección de *P. xanthii* en plántulas de calabacita.

La figura 3 muestra el avance de la severidad de la enfermedad causada por *P. xanthii* en plántulas de calabacita a lo largo de 20 días después de la aplicación de los tratamientos a la concentración 10<sup>-1</sup>. El

tratamiento con el nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> presentó la menor severidad promedio en comparación con el testigo, con una diferencia de hasta 20 % en la cantidad de infección. Los tratamientos con KIO<sub>3</sub> y NPsCS no presentaron diferencias en la reducción de la enfermedad con el testigo. Este resultado reafirma la reducción de la enfermedad solo con el nanocompuesto.



**Figura 3. Severidad de la enfermedad por cenicilla en plántulas de calabacita en un periodo que comprendió desde la primera aplicación de los tratamientos en el día siete hasta la segunda aplicación en el día 20 a la concentración 10<sup>-1</sup>. Nota: La severidad fue expresada en la escala Horsfall-Barrat.**

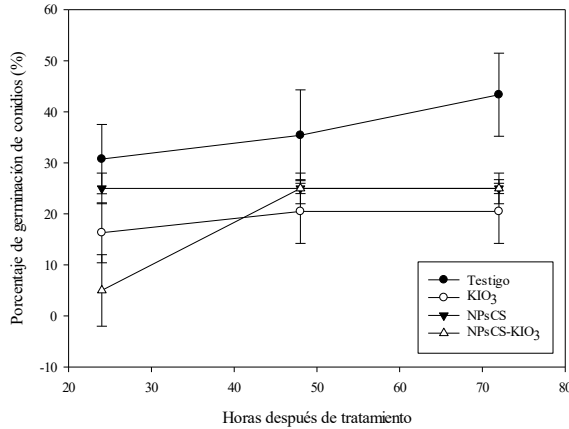
La figura 4 presenta la germinación de conidios de *P. xanthii* en las 24, 48 y 72 horas después de la aplicación de los tratamientos a la concentración 10<sup>-1</sup>. Se pudo apreciar que las NPsCS, KIO<sub>3</sub> y el nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> redujeron de manera equiparable la germinación de conidios con un promedio del 30 % en las últimas 72 horas en comparación al testigo. Lo anterior sugiere mayor cantidad de ensayos necesarios para evidenciar efectos citológicos en la germinación de los conidios.

**Tabla 1. Tasa de infección aparente y coeficiente de determinación lineal desde el surgimiento de la enfermedad y hasta el día 21 después de la última aplicación de los tratamientos en plántulas de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) con cenicilla.**

	Testigo	KIO <sub>3</sub> -2.5			NPsCS			NPsCS-KIO <sub>3</sub> -2.5		
		10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>
Tasa de infección aparente	0.110 <sup>x</sup>	0.077	0.080	0.094	0.080	0.088	0.085	0.060	0.101	0.071
Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	0.897 <sup>y</sup>	0.725	0.723	0.806	0.695	0.741	0.761	0.691	0.810	0.806

<sup>x</sup>Valor calculado con los logaritmos naturales (Ln) del Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) en las fechas de evaluación.

<sup>y</sup>Valor obtenido de la línea de tendencia lineal.



**Figura 4. Germinación de conidios 24, 48, y 72 horas posteriores a la aplicación de los tratamientos a la concentración  $10^{-1}$ .**

La tabla 2 presenta los efectos de los tratamientos a la concentración  $10^{-1}$  en la germinación, la biomasa radicular y el número de hojas verdaderas en plántulas de calabacita. No se observaron diferencias significativas en la germinación ni en la biomasa radicular entre los tratamientos y el testigo. Sin embargo, el nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> incremento significativamente el número de hojas verdaderas a partir del día 34 después de la siembra, lo que indica un efecto estimulante en el desarrollo foliar.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las nanopartículas de quitosano-yodato de potasio (NPsCS-KIO<sub>3</sub>), aplicadas a bajas concentraciones, ejercen un efecto bioestimulante y un efecto fungistático sobre *Podosphaera xanthii* en plántulas de calabacita. Estos resultados sugieren la existencia de una mayor efectividad del nanocompuesto NPsCS-KIO<sub>3</sub> en comparación a las aplicaciones por separado. Al respecto, existe evidencia documental de resultados *in vitro* de los efectos fungicidas de las nanopartículas de quitosano en varias especies de patógenos, no obstante, no existe información respecto al efecto fungicida o fungistático *in vivo* de las nanopartículas

de quitosano-yodato (Kheiri *et al.*, 2016). El yodo es un elemento traza esencial para los seres humanos (Hatch-McChesney y Lieberman, 2022), no se considera esencial para las plantas, sin embargo, existe evidencia del aumento en la tolerancia de las plantas a algunos factores de estrés cuando son aplicados de manera exógena (Gupta *et al.*, 2016).

Por otro lado, existe evidencia de la estimulación en el crecimiento de plántulas de tomate con la aplicación al sustrato de yodato de potasio (Medrano-Macías *et al.*, 2016). El efecto bioestimulante de las NPsCS en general se ha logrado con aplicaciones a bajas concentraciones en varias especies cultivadas (González-García *et al.*, 2022). Este efecto observado a bajas concentraciones puede atribuirse a que, algunas sustancias bioactivas, inducen respuestas horméticas en los cultivos, el cual se caracteriza por la estimulación de procesos fisiológicos sin efectos negativos (Iavicoli *et al.*, 2018).

Recientemente se reportó que las nanopartículas de quitosano a una dosis de 0.4 mg L<sup>-1</sup> promovieron el rendimiento en 24 % superior al testigo en plantas adultas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2024). Treviño-Ruiz *et al.* (2024), registraron incrementos en el rendimiento en la misma especie hasta 30.8% con el complejo nanoquitosano-yodo. Rivera Solís *et al.* (2024), registraron un incremento en 29 % el vigor de plantas de tomate con el complejo nanopartículas de quitosano-yodato de potasio. En este trabajo se registró que las nanopartículas de quitosano-yodato de potasio a una concentración de 2.5 mg L<sup>-1</sup>, estimularon el desarrollo foliar y adicionalmente mostraron un efecto fungistático contra el patógeno foliar *Podosphaera xanthii* en *Cucurbita pepo* L. Lo anterior sugiere la consideración del uso de las nanopartículas de quitosano-yodato con beneficio dual con miras a la reducción del uso de fungicidas sintéticos los cuales no solo afectan la salud humana, sino que también incide negativamente en los parámetros agronómicos y bioquímicos de las plantas (Mourad *et al.*, 2017). También se ha registrado el uso de las NPsCS como

**Tabla 2. Efecto de los tratamientos a  $10^{-1}$  de concentración en la germinación, biomasa radicular, y número de hojas por planta en calabacita (*Cucurbita pepo* L.)**

	Germinación	Peso radicular (mg)		Número de hojas verdaderas				
		Fresco	Seco	20 DDS	27 DDS	34 DDS	41 DDS	48 DDS
Testigo	0.86 <sup>x</sup> ±0.0 <sup>y</sup> a	0.64±0.2a	0.52±0.1a	5.0±1.5a	7.8±1.4a	12.0±1.5b	16.4±1.8b	22.6±2.3b
KIO <sub>3</sub> -25	0.85±0.0 a	0.49±0.0a	0.40±0.1a	6.4±1.1a	10.2±1.3a	14.4±1.1ab	18±1.0ab	23.8±1.9ab
NPsCS	0.85±0.0 a	0.45±0.1a	0.28±0.0a	6.2±1.3a	9.8±1.6a	14.6±1.1ab	19.2±1.3ab	25.6±1.3ab
NPsCS-KIO <sub>3</sub> -25	0.85±0.0 a	0.46±0.1a	0.45±0.1a	6.2±2.1a	10.0±2.2a	15.8±0.8a	21.2±1.4a	26.8±1.9a
Valor P	0.8638	0.1130	0.3106	0.5098	0.1362	0.0012	0.0006	0.0143

<sup>x</sup>Medias con la misma literal entre los tratamientos no son diferentes estadísticamente de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). <sup>y</sup>Error estándar (n = 5). DDS = días después de siembra.

acarreador de fungicidas sintéticos con buenos resultados. Maluin *et al.* 2020, registraron que las NPsCS redujeron el efecto fitotóxico del fungicida Dazomet en plántulas de palma *Tenera (dura x pasiflora)*; la reducción del efecto fitotóxico se encontró en función del tamaño nanométrico de las nanopartículas.

### CONCLUSIÓN

Los resultados del presente estudio muestran que el nanoquitosano-yodato de potasio aplicado a una concentración de 2.5 mg L<sup>-1</sup> estimula el desarrollo foliar de *Cucurbita pepo* L. y promueve un efecto fungistático in vivo de *Podosphaera xanthii* en comparación a las aplicaciones por separado como KIO<sub>3</sub> y NPsCS. Estos resultados respaldan el uso potencial del nanocompuesto en estrategias de manejo sostenible de enfermedades foliares en cucurbitáceas.

**Funding.** The authors of the article declare that they have not received any funding to carry out this work.

**Conflict of interest.** The authors of the article declare that they have no conflicts of interest regarding the work carried out.

**Compliance with ethical standard.** Due to the nature of the work, approval from any ethics committee was not required.

**Data availability.** Data available upon reasonable request to the authors.

**Author contribution statement (CRediT).** N. Francisco-Francisco – Research, writing–preparation of the original draft. J.F. León De la Rocha – Methodology and validation. H. Ortega-Ortiz – Supervision, resources.

### REFERENCES

- Bojórquez, R.C., León, F.L., Allende, M.R., Muy, R.M.D., Carrillo, F.J.A. and Valdez, T.J.B., 2012. Characterization of powdery mildew in cucumber plants under greenhouse conditions in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 7(21), pp. 3237-3248. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.2093>
- Campbell, C.L. and Madden, L.V., 1990. Introduction to Plant Disease Epidemiology. *Editorial John Wiley & Son*, New York, USA, p. 560.
- Chavali, M.S. and Nikolova, M.P., 2019. Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Applied Sciences*, 1(6), p. 607. <https://doi.org/10.1007/S42452-019-0592-3>
- De La Rocha, J.F.L., Bojórquez-Ramos, C., Francisco-Francisco, N., Olivar-Hernández, A., López-España, R.G., Reyes-Duque, Y. and Pérez-Olvera, P., 2020. Identificación del agente causal del mildiu polvoriento en plantas de calabaza (*Cucurbita pepo* L.) en Tehuacán, México. *Revista de Protección Vegetal*, 35(2), pp. 1-9.
- Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N. and Mnif, W., 2016. Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: A critical review. *Medicines*, 3(4), p. 25. <https://doi.org/10.3390/medicines3040025>
- Elmowafy, M., Shalaby, K., Elkomy, M.H., Alsaidan, O.A., Gomaa, H.A.M., Abdelgawad, M.A. and Mostafa, E.M., 2023. Polymeric Nanoparticles for Delivery of Natural Bioactive Agents: Recent Advances and Challenges. *Polymers*, 15(5), p. 1123. <https://doi.org/10.3390/POLYM15051123>
- Fernández-Ortuño, D., Pérez-García, A., López-Ruiz, F., Romero, D., De Vicente, A. and Torés, J. A. 2006. Occurrence and distribution of resistance to QoI fungicides in populations of *Podosphaera fusca* in south central Spain. *European Journal of Plant Pathology*, 115, pp. 215-222. <https://doi.org/10.1007/s10658-006-9014-7>
- El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.M., Desoky, E.S.M., Babalghith, A.O., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Ebrahim, A.A.M., Abd El-Mageed, T.A., Elrys, A.S., Elbadawi, A.A., El-Tarabily, K.A. and AbuQamar, S.F., 2022. Role of Nanoparticles in Enhancing Crop Tolerance to Abiotic Stress: A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*, 13, p. 946717. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.946717/PDF>
- Gastélum, R.F., Apodaca, S.M.A., Martínez, V.M.C. and Espinosa, M.S., 2005. *Podosphaera* (Sect. Sphaerotheca) *xanthii* (Castagne). Brawn, U. y Shishkoff, N. en cucurbitáceas en el norte de Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 23, pp. 162-168.
- González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A. and Juárez-Maldonado, A., 2022. Impact of chitosan and chitosan based nanoparticles on plants growth and

- development. *Role of Chitosan and Chitosan-Based Nanomaterials in Plant Sciences*, pp. 255-271. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85391-0.00002-2>
- González-Morales, S., Cárdenas-Atayde, P.A., Garza-Alonso, C.A., Robledo-Olivo, A. and Benavides-Mendoza, A., 2022. Plant Biostimulation with Nanomaterials: A Physiological and Molecular Standpoint. *Inorganic Nanopesticides and Nanofertilizers: A View from the Mechanisms of Action to Field Applications*, pp. 153-185. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94155-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94155-0_5)
- Gupta, N., Shukla Bajpai, M., Majumdar, R.S. and Singh, D., 2016. Effect of exogenous iodine on enhancement of oxidative stress in soybean (*Glycine max*) plant and partial expression of 1-Cys peroxiredoxin gene under heat-stress conditions. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(5), pp. 686-690. <https://doi.org/10.56093/ijas.v86i5.58356>
- Hatch-McChesney, A. and Lieberman, H.R., 2022. Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients* 2022, 14(17), p. 3474. <https://doi.org/10.3390/NU14173474>
- Horsfall, J.G. and Barrat, R.W., 1945. An improved grading system for measuring plant disease. *Phytopathology*, p. 655.
- Jiang, Q., Xie, Y., Peng, M., Wang, Z., Li, T., Yin, M., Shen, J. and Yan, S., 2022. A nanocarrier pesticide delivery system with promising benefits in the case of dinotefuran: strikingly enhanced bioactivity and reduced pesticide residue. *Environmental Science: Nano*, 9(3), pp. 988-999. <https://doi.org/10.1039/D1EN00752A>
- Khan, I., Saeed, K. and Khan, I., 2019. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), pp. 908-931. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2017.05.011>
- Kheiri, A., Moosawi Jorf, S.A., Mallhipour, A., Saremi, H. and Nikkha, M., 2016. Application of chitosan and chitosan nanoparticles for the control of Fusarium head blight of wheat (*Fusarium graminearum*) in vitro and greenhouse. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, pp. 1261-1272. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2016.09.072>
- Kiferle, C., Ascrizzi, R., Martinelli, M., Gonzali, S., Mariotti, L., Pistelli, L., Flamini, G. and Perata, P., 2019. Effect of Iodine treatments on *Ocimum basilicum* L.: Biofortification, phenolics production and essential oil composition. *PLOS ONE*, 14(12), pp. 1-23. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0226559>
- Iavicoli, I., Leso, V., Fontana, L. and Calabrese, E.J., 2018. Nanoparticle exposure and hormetic dose-responses: An update. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3), p. 805. <https://doi.org/10.3390/ijms19030805>
- Maluin, F.N., Hussein, M.Z., Yusof, N.A., Fakurazi, S., Idris, A.S., Zainol Hilmi, N.H. and Daim, L.D.J., 2020. Phytotoxicity of chitosan-based agronanofungicides in the vegetative growth of oil palm seedling. *Plos One*, 15(4), pp. e0231315-e0231315. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0231315>
- McGrath, M.T. (2001). Fungicide resistance in cucurbit powdery mildew: experiences and challenges. *Plant Disease*, 85(3), pp. 236-245. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.3.236>
- Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., Juárez-Maldonado, A., Rocha-Estrada, A. and Benavides-Mendoza, A., 2016. Efecto de la aplicación de yodo sobre antioxidantes en plántulas de jitomate. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 22(2), pp. 133-143. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSH.2015.12.025>
- Mourad, B., Baha-Eddine, B. and Mokhtar, B., 2017. The Impact of a Hexaconazole Fungicide on Agronomic, Biochemical Parameters and Yield Components of Green Beans *Phaseolus vulgaris* cv. Djedida. *International Journal of Advanced Engineering and Management*, 2(6), pp. 146-152. <https://doi.org/10.24999/IJOAEM/02060035>
- Niculescu, A.G. and Grumezescu, A.M., 2022. Applications of Chitosan-Alginate-Based Nanoparticles—An Up-to-Date Review. *Nanomaterials* 2022, 12(2), p. 186. <https://doi.org/10.3390/NANO12020186>
- Ortega Ortiz, H., Alvarado-Tenorio, G., Comparán-Padilla, V.E. and Ramírez-Rodríguez, S.C.,



2016. Obtención de complejos yodados a partir de nanopartículas de quitosán y sales de yodo. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), México. Registro IMPI: MX/a/2022/015150. Disponible en: <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2022/015150>
- Ramírez-Rodríguez, S.C., Preciado-Rangel, P., Fuente, M.C.D. La, González-Morales, S. and Ortega-Ortiz, H., 2024. Chitosan Nanoparticles as Biostimulant in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Plants. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 93(4), p. 777. <https://doi.org/10.32604/PHYTON.2024.048096>
- Rivera Solís, L.L., Ortega Ortíz, H., Benavides Mendoza, A., Flores López, M.L., Robledo Olivo, A. and González Morales, S., 2024. Efecto bioestimulante de nanoquitosán-yodo en el crecimiento y vigor de plantas de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2), p. 19. <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3623>
- Singh, R.P., Handa, R. and Manchanda, G., 2021. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329, pp. 1234-1248. <https://doi.org/10.1016/J.CONREL.2020.10.051>
- Treviño-Ruiz, K.S., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A. and González-Morales, S., 2024. Effect of nanochitosan-iodine application in lettuce on biofortification, growth and yield. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2), p. e3615 <https://doi.org/10.19136/ERA.A11N2.3615>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., Rehman, H.ur, Ashraf, I. and Sanaullah, M., 2020. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, p. 137778. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137778>
- Zhang, S., Liu, J., Xu, B. and Zhou, J., 2021. Differential Responses of Cucurbita pepo to *Podosphaera xanthii* Reveal the Mechanism of Powdery Mildew Disease Resistance in Pumpkin. *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 633221. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.633221>