

Respuesta del rendimiento y perfil bioquímico de lechuga ante las nanopartículas de hidroxiapatita y quitina

Yield and biochemical profile response of lettuce to hydroxyapatite nanoparticles and chitin

Jessica Janeth Rocha-Santillano¹ , Pablo Preciado-Rangel² , Sergio Arturo Ortiz-Díaz² ,
Eduardo Arón Flores-Hernández¹ , Alejandro Moreno-Reséndez¹ , Anselmo González-Torres^{1*} 

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico Raúl López Sánchez, Colonia Valle Verde. CP. 27054. Torreón, Coahuila, México.

²Tecnológico Nacional de México-Campus Instituto Tecnológico de Torreón. Ctra. Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana. CP. 27170. Torreón, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: anselgonz@hotmail.com

Artículo científico

Recibido: 02 de marzo 2026

Aceptado: 26 de julio 2026

RESUMEN. La producción de lechuga enfrenta desafíos que exigen alternativas sostenibles para mejorar su productividad y calidad. El objetivo de esta investigación se centró en determinar el impacto de la aplicación combinada de nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) y un bioestimulante a base de quitina (BQ) sobre el rendimiento, compuestos fitoquímicos y actividad enzimática del cultivo. El experimento se estructuró bajo un arreglo completamente aleatorizado, evaluando dos concentraciones de nHAp (1 000 y 2 000 mg L⁻¹) aplicadas por imbibición de semilla y BQ vía foliar, dando un total de cinco tratamientos incluyendo un testigo, con cinco repeticiones cada uno. Los resultados mostraron que el tratamiento T3 (2 000 mg L⁻¹ nHAp) maximizó la producción de biomasa 28.17%. Por otro lado, la calidad bioquímica se favoreció al suministrar la dosis de 1 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ (T4), registrando aumentos del 19.16% en fenoles totales y 15.27% en flavonoides en comparación con el testigo. De igual manera, la combinación de (2 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ) (T5) potenció el contenido de ácido L-ascórbico, aunque indujo una respuesta de defensa antioxidante mediada por la enzima catalasa. Las nHAp individuales actúan como promotores eficaces del rendimiento, mientras que su combinación con quitina induce un eustrés que favorece la biofortificación.

Palabras clave: Bioestimulación, eustrés, imbibición de semilla.

ABSTRACT. Lettuce production faces challenges that require sustainable alternatives to improve productivity and crop quality. The objective of this research was to evaluate the effect of the combined application of hydroxyapatite nanoparticles (nHAp) and a chitin-based biostimulant (CB) on yield, phytochemical compounds, and enzymatic activity of the crop. The experiment was structured under a completely randomized design, evaluating two concentrations of nHAp (1 000 and 2 000 mg L⁻¹) applied via seed imbibition and CB via foliar application, resulting in a total of five treatments including a control, with five replicates each. The results showed that treatment T3 (2,000 mg L⁻¹ nHAp) maximized biomass production by 28.17%. Additionally, biochemical quality was improved by the 1 000 mg L⁻¹ nHAp + CB treatment (T4), which recorded increases of 19.16% in total phenols and 15.27% in flavonoids compared to the control. Similarly, the 2 000 mg L⁻¹ nHAp + CB treatment (T5) enhanced the L-ascorbic acid content, although it induced an antioxidant defense response mediated by the catalase enzyme. Applied individually, nHAp act as effective yield promoters, whereas their combination with chitin induces a state of eustress that favors biofortification.

Keywords: Biostimulation, eustress, seed imbibition.

Como citar: Rocha-Santillano JJ, Preciado-Rangel P, Ortiz-Díaz SA, Flores-Hernández EA, Moreno-Reséndez A, González-Torres A (2026) Respuesta del rendimiento y perfil bioquímico de lechuga ante las nanopartículas de hidroxiapatita y quitina. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5221. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5221.

INTRODUCCIÓN

Destacando por su alto valor en el mercado agrícola, la lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una especie hortícola (Grzegorzewska *et al.* 2023) que contiene compuestos biológicamente activos benéficos para la salud; es una fuente importante de vitaminas y minerales (Shi *et al.* 2022). Tanto la producción como los atributos comerciales de esta especie se ven desafiados debido a factores bióticos y abióticos que limitan su producción óptima, incluyendo condiciones climáticas adversas, suelos con nutrientes limitados e incidencia de plagas y enfermedades (Cáceres-Rodríguez *et al.* 2022). Estos desafíos reflejan la necesidad de implementar estrategias innovadoras para mejorar la productividad y enfrentar así la creciente demanda de alimentos de alta calidad (FAO 2025).

Las prácticas agrícolas tradicionales no son eficientes para contrarrestar el estrés provocado por los factores del entorno y la disminución de suelos fértiles (Carranza-Patiño *et al.* 2024). El uso desmedido de fertilizantes sintéticos ha generado daños ambientales e impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles que mejoren los parámetros productivos y las características comerciales de las plantaciones (Oñate *et al.* 2023). Una alternativa prometedora es el uso de bioestimulantes, como las nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) y potenciadores metabólicos a base de quitina que han demostrado mejorar la fenología y acumulación de biomasa de múltiples especies vegetales (Ibrahim *et al.* 2023, Gómez-García *et al.* 2025). Las nHAp de composición química $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, tienen amplia área superficial, tamaño y forma adecuadas para el sector agrícola (Abdelmigid *et al.* 2022, Noruzi *et al.* 2023). Se ha demostrado su efecto elicitor al inducir respuesta de defensa como la activación de rutas de señalización que eleva la biosíntesis de compuestos secundarios como fenoles y flavonoides, además de mejorar el crecimiento, biomasa y tejido radicular de diversos cultivos (Pilotto *et al.* 2024, Rocha-Santillano *et al.* 2025). Por otro lado, el BQ es un inductor formulado a base de polisacárido N-acetil-D-glucosamina, es reconocido por los receptores foliares de la planta y desencadena respuestas de defensa como la enzima peroxidasa (Rojas-Pirela *et al.* 2024). El BQ ha mostrado efectos positivos en el crecimiento, desarrollo e inducción de mecanismos de defensa (Costales-Menéndez *et al.* 2021). La producción de este tipo de metabolitos secundarios es deseable debido a que contienen propiedades biológicas y farmacéuticas, que se utilizan en diferentes industrias de relevancia económica (Twaij y Hasan, 2022). La estimulación de rutas biosintéticas para la producción de fitoquímicos mediante bioestimulantes y nanomateriales ha abierto nuevas vías de investigación en la ciencia agrícola, sin embargo, la aplicación de éstos representa retos como garantizar la biocompatibilidad de las formulaciones, para no comprometer el crecimiento y desarrollo de la planta (Ranjha *et al.* 2022). Atendiendo a esta necesidad, la investigación busca determinar la influencia que ejerce la adición combinada de nanopartículas de hidroxiapatita junto con el bioestimulante a base de quitina sobre la productividad, los atributos nutraceuticos y la actividad enzimática de esta hortaliza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

La fase de campo del bioensayo abarco de enero a abril de 2025. Las plantas se dispusieron dentro de un sombreadero tipo geodésico, localizado en el área de invernaderos de la UAAAN

(Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro) Unidad Laguna. Dicha sede se encuentra en Torreón, Coahuila, México, (intersección del periférico Raúl López Sánchez y carretera Santa Fe, km 1.5). El sitio presenta una altitud de 1 123 msnm, ubicado geográficamente a 25° 31' 11" de latitud norte y 103° 25' 75" de longitud oeste.

Material vegetal y condiciones durante el experimento

Para el establecimiento del bioensayo se recurrió al uso de semilla comercial de la marca Kristen Seed®, correspondiente a la variedad Parris Island (*Lactuca sativa* L.). La germinación se realizó en charola de plástico con sustrato Peat most. Luego de veinte días desde la siembra se realizó el trasplante de las plántulas en macetas de plástico negro con capacidad de 5 litros, utilizando como sustrato arena 80% y perlita 20%, el cual fue desinfectado previamente con hipoclorito de sodio al 5%. Se colocaron las macetas en hileras con un total de cuatro plantas por metro cuadrado. El riego fue a través de la solución nutritiva Steiner, se fue incrementando la cantidad hasta la etapa de crecimiento vegetativo en la cual se aplicó de 1-1.5 L por maceta hasta el periodo de cosecha. Durante el estudio la temperatura promedio se mantuvo estable en un rango de 21.9 a 29.5 °C. La humedad relativa (HR) registrada en el interior del sombreadero fue de aproximadamente 22% durante todo el periodo de producción.

Tratamientos y diseño experimental

Las nHAp fueron otorgadas por el Centro de Investigación en Química Aplicada de la Ciudad de Saltillo, Coahuila, México. El tamaño de partícula osciló entre 15 y 25 nm, predominando la morfología de bastón (Flores-Hernández *et al.* 2021). Dichas características fueron consideradas deseables para el área agronómica. El bioestimulante a base de quitina fue el producto comercial de la empresa Agromarsa®. El diseño experimental fue completamente aleatorizado. Los tratamientos consistieron en un control (T1), T2; 1 000 mg L⁻¹ nHAp, T3; 2 000 mg L⁻¹ nHAp, T4; 1 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ 2 ml L⁻¹ y T5; 2 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ 2 ml L⁻¹. Lo que dio un total de cinco tratamientos con cinco repeticiones cada uno.

Las nHAp se aplicaron en el proceso de imbibición de la semilla en la etapa de pre-germinación. Para la concentración se utilizó una solución inicial de 2 000 mg L⁻¹ de nHAp, usando un sonificador Tianjin Autoscience (AS2060, Instrumental Factory®). Se prepararon los tratamientos; 1 000 y 2 000 mg L⁻¹, en 40 mL de la solución de nHAp se sumergieron las semillas de lechuga durante 1 hora (Ortiz *et al.* 2017), después de transcurrido ese tiempo, se retiraron las semillas de la solución. El bioestimulante de quitina se aplicó mediante pulverización foliar a las plantas durante el ciclo del cultivo (en intervalos de 15 días a partir del trasplante).

Variables evaluadas

Componentes del rendimiento

A los 60 días después del trasplante, mediante una balanza (Ohaus, PX224) se determinó el peso fresco de las plantas de lechuga recién cosechadas. El área foliar (AF) se determinó utilizando un método indirecto no destructivo, basado en un modelo de regresión lineal simple. Dicha propuesta cuenta con un coeficiente de determinación (R²) de 0.9851 según Lakitan *et al.* (2025). $AF =$

$0.6907 \times (\text{Largo} \times \text{Ancho})$. Mediante esta ecuación se estimó el área foliar total de las plantas a partir de sus mediciones de largo y ancho de hoja.

Obtención de extractos para análisis bioquímicos

Se pesaron 2 g de hojas frescas, los cuales fueron mezclados con 10 mL de alcohol etílico en tubos de polipropileno con cierre hermético. Las muestras se incubaron en un agitador rotatorio (modelo HZ-300) bajo condiciones controladas de 5 °C, a una velocidad de 20 rpm durante 6 horas. Posteriormente, los tubos fueron sometidos a centrifugación a 3 000 rpm durante 5 minutos para separar las fases. El sobrenadante obtenido fue recolectado para realizar los análisis correspondientes. Los procedimientos se llevaron a cabo por tratamiento, con tres repeticiones para cada uno.

Compuestos fitoquímicos

La determinación del contenido fenólico total se realizó por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.* 1999). En un espectrofotómetro ultravioleta-visible (UV-Vis: Metash, UV-6 000) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresan en miligramos de equivalentes de ácido gálico por 100 gramos de peso fresco (mg GAE 100 g⁻¹ PF). Además, se cuantificó la cantidad de flavonoides totales mediante un espectrofotómetro UV-Vis (Metash, UV-6 000) a 510 nm, se reportaron los resultados como miligramos de equivalentes de quercetina por 100 gramos de peso fresco (mg QE 100 g⁻¹ PF) (Zhishen *et al.* 1999). Por el método de DPPH+ se evaluó la capacidad antioxidante (Brand-Williams *et al.* 1995). Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro UV-Vis (Metash, UV-6 000) a una longitud de 517 nm, y los resultados se reportaron como micromoles de equivalente Trolox por 100 gramos de peso fresco (μM ETrolox 100 g⁻¹ PF). El contenido de ácido L-ascórbico se determinó mediante la metodología descrita por Klein y Perry (1982). Los resultados se reportan como miligramos por cien gramos de peso fresco (mg 100 g⁻¹ PF).

Actividad enzimática

El extracto enzimático se obtuvo mediante la metodología de Ramos *et al.* (2010). La actividad de la peroxidasa se determinó utilizando el método de Kar y Mishra (1976) y de la catalasa por la metodología de Braber (1980). Ambas reportadas en U mg⁻¹ proteína.

Análisis estadístico

Para los resultados obtenidos de las variables bioquímicas, el análisis estadístico consideró cuatro réplicas biológicas elegidas al azar por cada tratamiento. La cuantificación de cada muestra biológica se realizó mediante tres réplicas técnicas en el laboratorio para garantizar la fiabilidad analítica. Se analizaron mediante ANOVA tomando como unidad experimental a la réplica biológica (n = 4 por tratamiento) aplicando la prueba de Tukey para comparar medias con una significancia $P \leq 0.05$. Previo al análisis, se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. En todos los casos los residuos cumplieron con los criterios de normalidad ($P > 0.05$). Se usó el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4.

RESULTADOS

Rendimiento

El análisis de la variable rendimiento mostró efectos significativos con la aplicación de los tratamientos en el cultivo de lechuga. El tratamiento T3 destacó con una respuesta estadísticamente superior en comparación con el resto de los tratamientos evaluados, alcanzado una biomasa fresca de 457.25 g planta⁻¹ (Figura 1). Superando a los tratamientos que incorporaron BQ y al control en un 28.17%.

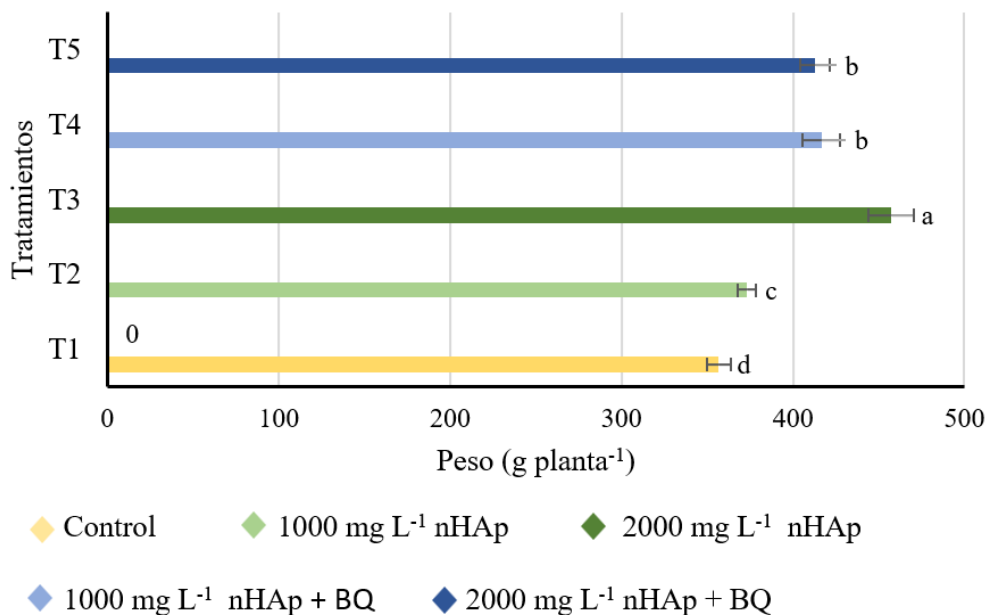


Figura 1. Rendimiento en peso fresco de lechuga con aplicación de dosis de nHAp y bioestimulante de quitina. Valores que comparten la misma literal carecen de diferencia estadística significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto a los resultados de la variable área foliar se incrementó la superficie total de las hojas de lechuga con el T3, que corresponde a la dosis más alta de nHAp sin combinarse con BQ. Con respecto al control incremento un 56.90% (Figura 2). Lo que indica que el BQ en combinación con la dosis baja de nHAp no genera un aumento estadísticamente significativo del área foliar.

Compuestos fitoquímicos

Los metabolitos secundarios de las hojas de lechuga se vieron afectados considerablemente de manera positiva con los tratamientos que combinan las nHAp y el BQ (Figura 3). En la variable de respuesta fenoles totales se destaca el valor máximo (459.57 mg AGE 100 g⁻¹ PF) con el tratamiento que corresponde a 1 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ (T4), con un incremento de 19.16% con respecto al tratamiento control.

En cuanto al contenido de flavonoides totales el tratamiento de 1000 mg L⁻¹ nHAp + BQ (T4) obtuvo la concentración más alta (549.46 mg QE 100 g⁻¹ PF) con respecto al control, incrementando un 15.27%, y con valores estadísticamente similares a los observados con el T3. Esto indica que la adición de un componente no garantiza el aumento, es la combinación específica lo que determina

el resultado. Se evaluó la capacidad antioxidante y se obtuvo que los tratamientos generaron efectos altamente significativos. Al igual que la variable anterior, el T4 fue el que tuvo el mayor incremento de esta característica, y nuevamente con valores estadísticamente similares al T3. En cuanto al T5 que resultó estadísticamente igual al T1, lo cual demuestra que la aplicación conjunta de dosis alta de nHAp y BQ anula los beneficios individuales, generando una capacidad antioxidante tan baja como la obtenida de las plantas del tratamiento control.

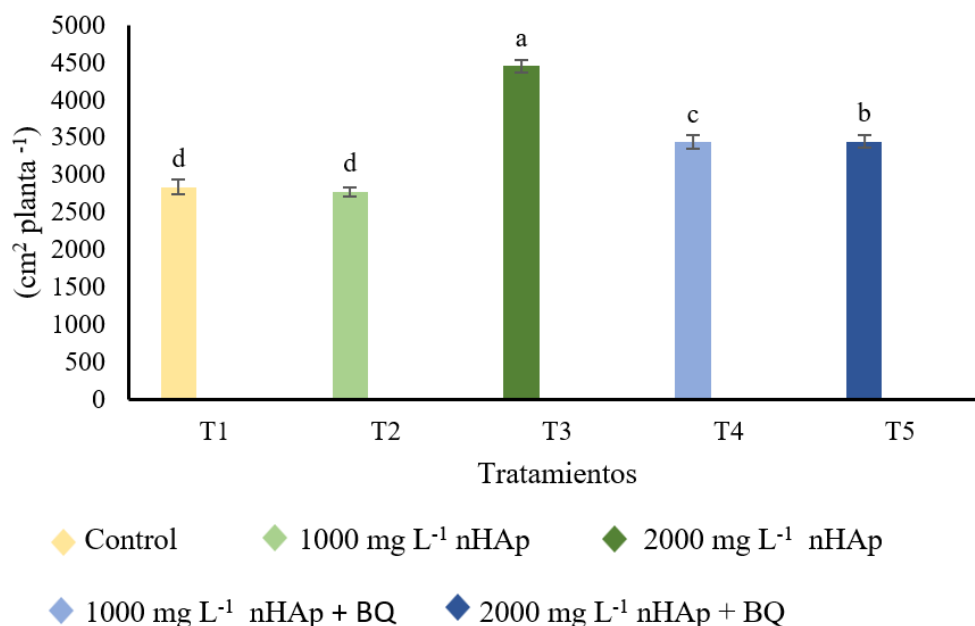


Figura 2. Área Foliar de plantas de lechuga en respuesta a diferentes tratamientos de nHAp y BQ. Valores que comparten la misma literal carecen de diferencia estadística significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Con respecto al contenido de ácido L-ascórbico, se obtuvo que el tratamiento que logró la mayor concentración fue el de 2 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ (T5), incrementando el contenido hasta un 98.86% con respecto al control. Esto indica que al incrementar la dosis de nHAp el contenido de ácido ascórbico aumenta, y este aumento es más pronunciado cuando el bioestimulante está presente.

Actividad enzimática antioxidante

En la actividad enzimática antioxidante de las hojas de lechuga, se encontró un incremento en la expresión de la peroxidasa con la aplicación del tratamiento 2 (1 000 mg L⁻¹ nHAp), manteniendo los niveles del tratamiento control e incluso incrementando numéricamente, pero sin mostrar diferencias estadísticas en comparación con el control. Los tratamientos 3, 4 y 5 tuvieron una evidente y significativa reducción en el contenido de esta enzima, como se puede observar en la figura 4a. Al aumentar la dosis de nHAp, o al añadir el BQ se observó una inhibición estadísticamente significativa de esta enzima. Por su parte, la enzima catalasa incrementó su contenido (Figura 4b) con la aplicación de los tratamientos T3, T4 y T5, siendo estadísticamente similares entre sí, y superiores en comparación con el tratamiento control (T1) y con el T2. En relación con la enzima peroxidasa se observa que los tratamientos que tuvieron menor expresión fueron los que incrementaron considerablemente la catalasa.

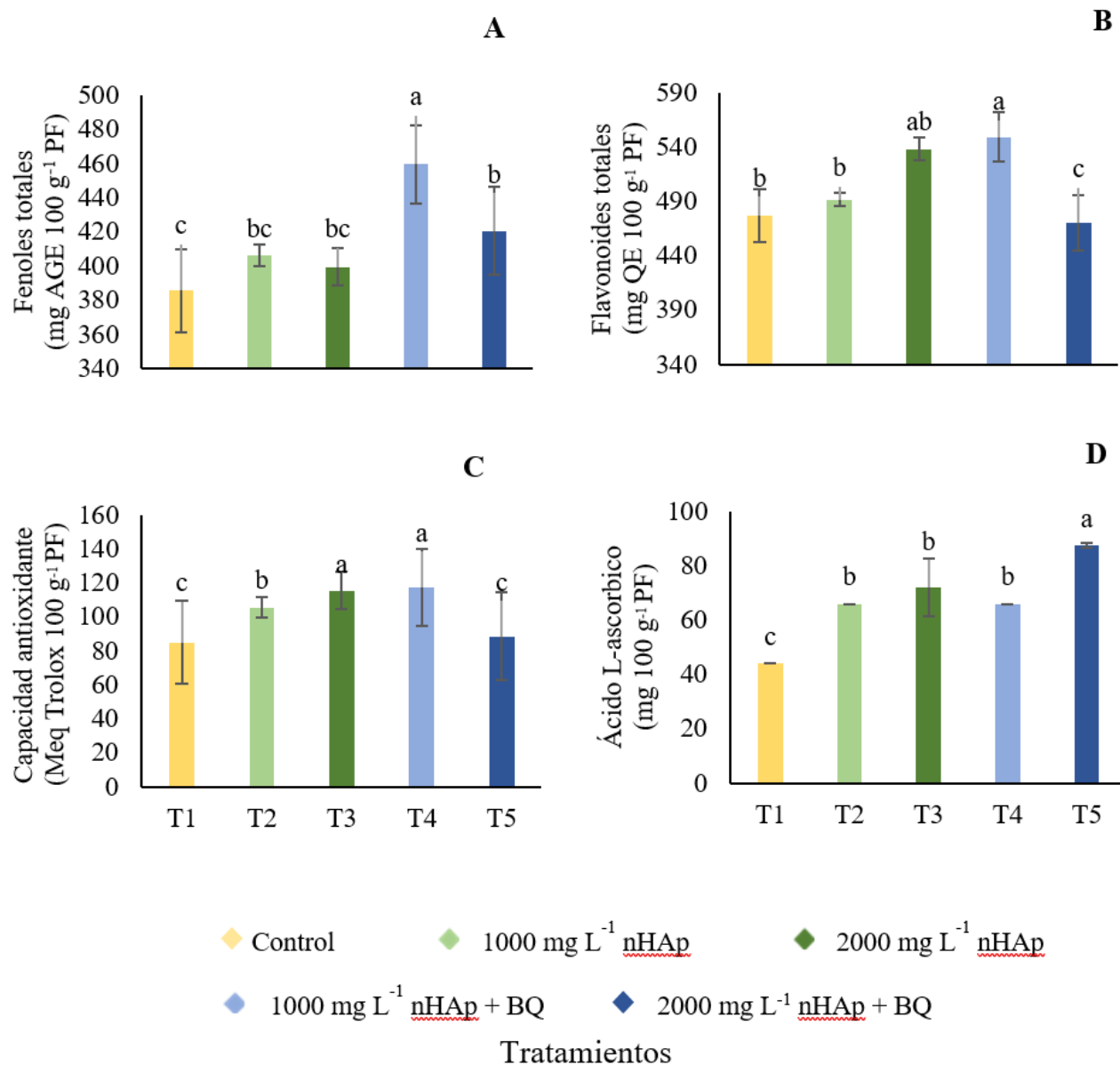


Figura 3. Compuestos fitoquímicos. Fenoles totales (A), flavonoides totales (B), capacidad antioxidante (C) y ácido L-ascórbico (D) en hojas de lechuga con efecto de los tratamientos aplicados. Valores que comparten la misma literal carecen de diferencia estadística significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

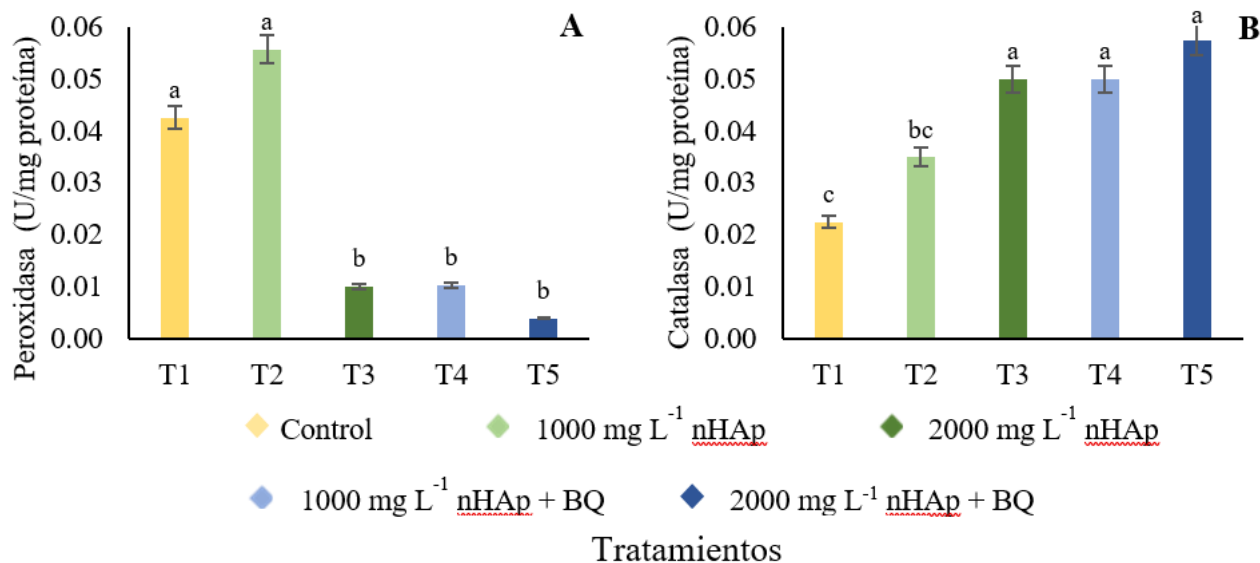


Figura 4. Actividad enzimática, (A) Peroxidasa (B) Catalasa en hojas de lechuga con efecto de los tratamientos aplicados. Valores que comparten la misma literal carecen de diferencia estadística significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Rendimiento

Se observó que al incrementar la dosis de nHAp el rendimiento aumentó significativamente, lo que sugiere que las nHAp actúan como un promotor, maximizando la producción de biomasa como lo indica Elsayed *et al.* (2022). Lo cual, se relaciona directamente con el incremento del área foliar observado con el T3. Sin embargo, la aplicación del BQ en combinación con la dosis alta de nHAp obtuvo un rendimiento estadísticamente menor al obtenido por las nHAp por sí solas. Este antagonismo observado, sugiere que la combinación de ambos insumos pudo haber inducido un estrés abiótico supraóptimo, mientras que el T3 generó un nivel de estrés benéfico que se reflejó en el incremento del rendimiento y área foliar. El T5 superó el nivel de tolerancia de la planta forzándola a desviar energía hacia el mecanismo de defensa. Dicho comportamiento concuerda con lo reportado por Madanayake *et al.* (2021), en los cuales se probó un amplio rango de dosis y reportó un aumento significativo en la biomasa seca de plantas crecidas en medios que contenían nHAp en concentraciones de hasta 10 000 mg L⁻¹. Esto sugiere que en la lechuga, al igual que en el rábano, las nHAp aplicadas a concentraciones de 2 000 mg L⁻¹ no son fitotóxicas y actúan como un promotor del crecimiento y la producción de biomasa. Mientras que, Rocha-Santillano *et al.* (2024) mencionan que con la dosis de 2 000 mg L⁻¹ de nHAp no hubo efecto en el rendimiento en pimiento morrón. Estos hallazgos muestran lo contrario en lechuga, debido a que se utilizó la aplicación foliar, mientras que en este trabajo se aplicó por imbibición de la semilla. Y se ha observado que, la exposición a las nHAp durante la germinación puede actuar como un elicitador temprano (López-Martínez *et al.* 2023). Esta estimulación inicial optimiza el vigor de la plántula, mejora el establecimiento del sistema radicular y programa una respuesta metabólica más eficiente, que se traduce en una mayor acumulación de biomasa al final del ciclo (Nile *et al.* 2022).

Compuestos fitoquímicos

Sobre la cuantificación de los principios fitoquímicos, se observaron efectos combinados importantes entre los dos compuestos bioestimulantes. En cuanto al ácido L-ascórbico hubo una clara sinergia entre la dosis alta de nHAp y el BQ, donde el tratamiento T5 alcanzó la concentración máxima (Figura 3d). Lo anterior sugiere un estado de defensa activa, ya que con la biosíntesis de este compuesto se potencia la mitigación del estrés oxidativo, mediante la neutralización de las especies reactivas de oxígeno (ERO) (Wu *et al.* 2024), evidenciando que la planta estaba en un estado de defensa activa. Sin embargo, esta misma combinación (T5) tuvo un efecto antagónico en la capacidad antioxidante y los flavonoides totales, no fue el mejor tratamiento, colapsando a niveles estadísticamente similares a los del tratamiento control. Esto pudo ser debido a que la dosis alta de ambos bioestimulantes causó una desregulación metabólica, y por ende una disminución en la producción de metabolitos (Erofeeva 2022). Por otro lado, el incremento de los compuestos antioxidantes, como fenoles y flavonoides, así como una mayor capacidad antioxidante con la aplicación de 1 000 mg L⁻¹ + BQ, se explica por el eustrés inducido, en el cual, dosis óptimas interactúan con la planta desencadenando respuestas de defensa adaptativas como la activación de la ruta de los fenilpropanoides (Zheng *et al.* 2021, Rodríguez-Jurado *et al.* 2025). Según Rayanoothala *et al.* (2024), la quitina es un elicitor que, debido a sus propiedades, la planta lo identifica como PAMP (Patrón Molecular Asociado a Patógenos), y actúa desencadenando rutas metabólicas, como la del shikimato para producir antioxidantes que refuerzan la pared celular y protegen la planta (Shahrajabian *et al.* 2021). Este aumento de los compuestos bioactivos observado en el presente estudio es consistente con datos de otros autores (Lyalina *et al.* 2023, Ovali y Ünlü, 2024).

Actividad enzimática antioxidante

En la evaluación de la actividad enzimática antioxidante se encontró una regulación en las defensas de la planta, dada por una relación inversamente proporcional entre la actividad de la peroxidasa y la catalasa. Este sistema enzimático antioxidante desempeña un papel importante en la eliminación de ERO, que aumentan la exposición a la oxidación y daño a las células vegetales (Fedoreyeva 2024). La peroxidasa corresponde a la primera línea de defensa de la planta (Zhang *et al.* 2025). Como se observó los tratamientos T3, T4 y T5 activaron la expresión de la enzima catalasa inhibiendo la peroxidasa, indicando una reorganización del sistema de defensa, la catalasa se encarga de descomponer el H₂O₂ generado durante situaciones de estrés, es la segunda etapa donde lo recibe y lo convierte en una molécula de agua y oxígeno (Baker *et al.* 2023). Se evidencia que la planta aplicó un trade-off metabólico enfrentando a un estrés inhibitorio por la combinación de nHAp y BQ, en el cual priorizó la supervivencia celular, activando la enzima de desintoxicación rápida (catalasa), a expensas de la producción de flavonoides y la inhibición simultánea del rendimiento y la capacidad antioxidante.

CONCLUSIONES

La aplicación de nHAp por imbibición de la semilla y el bioestimulante de quitina de manera foliar demostró tener efectos complejos e interactivos sobre el cultivo de lechuga, en los cuales el

resultado final dependió de la variable de respuesta. La estrategia de bioestimulación debe seleccionarse en función del objetivo: el T3 (2 000 mg L⁻¹ nHAp) es óptimo para maximizar la productividad del cultivo de lechuga. Sin embargo, la dosis de 1 000 mg L⁻¹ + BQ incrementa los compuestos fitoquímicos en hojas de lechuga. Mientras que el T5 (2 000 mg L⁻¹ nHAp + BQ) es la estrategia superior para la biofortificación por su efecto en la concentración del ácido L-ascórbico foliar.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Unidad Laguna, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al programa de Doctorado en Ciencias en Producción Agropecuaria por el apoyo brindado para la elaboración de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen ningún tipo de conflicto de interés.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

No se presenta información complementaria, los datos experimentales están disponibles a petición al autor de correspondencia.

LITERATURA CITADA

- Abdelmigid HM, Morsi MM, Hussien NA, Alyamani AA, Alhuthal NA, Albukhaty S (2022) Green synthesis of phosphorous-containing hydroxyapatite nanoparticles (nHAP) as a novel nano-fertilizer: preliminary assessment on pomegranate (*Punica granatum* L.). *Nanomaterials* 12(9): 1527. <https://doi.org/10.3390/nano12091527>
- Baker A, Lin CC, Lett C, Karpinska B, Wright MH, Foyer CH (2023) Catalase: A critical node in the regulation of cell fate. *Free Radical Biology and Medicine* 199: 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2023.02.009>
- Braber JM (1980) Catalase and peroxidase in primary bean leaves during development and senescence. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* 97(2): 135-144. [https://doi.org/10.1016/S0044-328X\(80\)80027-4](https://doi.org/10.1016/S0044-328X(80)80027-4)
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995) Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology* 28: 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cáceres-Rodríguez JL, Eduard DA, Cortés-Gómez MC, Balaguera-Lopez HE (2022) Role of brassinosteroids in fruit trees with emphasis on abiotic stress conditions: A review. *Ciencia y Agricultura* 19(3). <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n3.2022.15367>
- Carranza-Patiño M, Aragundi-Sabando L, Macias-Barrera K, Paredes-Sarabia E, Villegas-Ramírez A (2024) Conservación y manejo sostenible del suelo en la agricultura: una revisión sistemática de prácticas tradicionales y modernas. *Código Científico Revista de Investigación* 5(E3): 1-28. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303>

- Costales-Menéndez D, Falcón-Rodríguez AB, Nápoles-García MC, Cabrera-Pino JC, Varela-Nualles M, Travieso-Hernández L (2021) Quitosano induce respuestas defensivas en plantas de soya inoculada con *Bradyrhizobium elkanii*. Cultivos Tropicales 42(2).
- Elsayed AA, Ahmed EG, Taha ZK, Farag HM, Hussein MS, AbouAitah K (2022) Hydroxyapatite nanoparticles as novel nano-fertilizer for production of rosemary plants. Scientia Horticulturae 295: 110851. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110851>
- Erofeeva EA (2022) Hormesis in plants: Its common occurrence across stresses. Current Opinion in Toxicology 30: 100333. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.006>
- Fedoreyeva LI (2024) ROS as signaling molecules to initiate the process of plant acclimatization to abiotic stress. International Journal of Molecular Sciences 25(21): 11820. <https://doi.org/10.3390/ijms252111820>
- Flores-Hernández EA, Lira-Saldivar RH, Ruiz-Torres NA, García-López JI, Moreno-Reséndez A, Rodríguez-Dimas N, Preciado-Rangel P, Mendoza-Retana SS (2021) Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su efecto en plántulas de *Raphanus sativus*. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(1). <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2747>
- Gómez-García OM, Flores-Hernández EA, López-Salazar R, Moreno-Reséndez A, Ramírez-Aragón MG (2025) Hydroxyapatite nanoparticles as an effective fertilizer in sunflower crop quality. Terra Latinoamericana 43: 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2191>
- Grzegorzewska M, Badelek E, Matysiak B, Kaniszewski S, Dyśko J, Kowalczyk W, Wrzodak A, Szwejdą-Grzybowska J (2023) Assessment of romaine lettuce cultivars grown in a vertical hydroponic system at two levels of LED light intensity. Scientia Horticulturae 313: 111913. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111913>
- Ibrahim EA, Ebrahim NES, Mohamed GZ (2023) Effect of water stress and foliar application of chitosan and glycine betaine on lettuce. Scientific Reports 13: 17274. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43992-0>
- Kar M, Mishra D (1976) Catalase, peroxidase, polyphenol oxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiology 57(2): 315-319. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315>
- Klein BP, Perry AK (1982) Ascorbic acid and vitamin A activity in selected vegetables from different geographical areas of the United States. Journal of Food Science 47: 941-945. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb12750.x>
- Lakitan B, Fhadilah N, Muda SA, Irmawati R, RPR (2025) Impacts of artificial shading on growth and some morphological traits of Romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Romaine) cultivated in urban areas. International Journal of Agricultural Technology 21(4): 1329-1346. <https://doi.org/10.63369/ijat.2025.21.4.1329-1346>
- López-Martínez G, Ruiz-Torres NA, DíazBarriga-Castro E, Lira-Saldivar RH, López-Hernández I, Luna-Anguiano J, Flores-Hernández EA (2023) Efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en el desarrollo y germinación de *Cucumis sativus* L. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(NEIII): e3608. <https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3608>
- Lyalina T, Shagdarova B, Zhuikova Y, Il'ina A, Lunkov A, Varlamov V (2023) Effect of seed priming with chitosan hydrolysate on lettuce (*Lactuca sativa*) growth parameters. Molecules 28(4): 1915. <https://doi.org/10.3390/molecules28041915>
- Madanayake NH, Adassooriya NM, Salim N (2021) The effect of hydroxyapatite nanoparticles on *Raphanus sativus* with respect to seedling growth and two plant metabolites. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 15: 100404. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100404>
- Nile SH, Thiruvengadam M, Wang Y, Samynathan R, Shariati MA, Rebezov M, Nile A, Sun M, Venkidasamy B, Xiao J, Kai G (2022) Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. Journal of Nanobiotechnology 20: 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>

- Noruzi M, Hadian P, Soleimanpour L, Ma'mani L, Shahbazi K (2023) Hydroxyapatite nanoparticles: an alternative to conventional phosphorus fertilizers in acidic culture media. *Chemistry and Biological Technologies in Agriculture* 10: 71. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00437-0>
- FAO (2025) OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2025-2034. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 191p. <https://doi.org/10.1787/67cefa05-es>
- Oñate JJ, Acebes P, Olea PP (2023) Aprender del pasado para afrontar el futuro. Desafíos ambientales de la agricultura española en el siglo XXI: una mirada desde el legado de Fernando González Bernáldez. *Revista Científica Ecosistemas* 32(Núm. Especial): 2495. <https://doi.org/10.7818/ecos.2495>
- Ortiz CG, Carrillo-González R, González-Chávez MCA, López LJ (2017) Síntesis de nanopartículas de hidroxiapatita y su toxicidad en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Agro Productividad* 10(12): 98-106. <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.352802>
- Ovali G, Ünlü HÖ (2024) Effects of chitosan application on the yield and quality of lettuce. *BioResources* 19(1): 985-997. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.985-997>
- Pilotto L, Zuluaga MYA, Scalera F, Piccirillo C, Marchiol L, Civilini M, Fellet G (2024) Sustainable crop fertilization by combining biogenic nano-hydroxyapatite and P solubilizing bacteria: Observations on barley. *Plant Nano Biology* 9: 100091. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100091>
- Ramos SJ, Faquin V, Guilherme LRG, Castro EM, Ávila FW, Carvalho GS, Bastos CEA, Oliveira C (2010) Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant, Soil and Environment* 56(12): 584-588. <https://doi.org/10.17221/113/2010-PSE>
- Ranjha MMAN, Shafique B, Rehman A, Mehmood A, Ali A, Zahra SM, Siddiqui SA (2022) Biocompatible nanomaterials in food science, technology, and nutrient drug delivery: recent developments and applications. *Frontiers in Nutrition* 8: 778155. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.778155>
- Rayanothala PS, Dweh TJ, Mahapatra S, Kayastha S (2024) Unveiling the protective role of chitosan in plant defense: a comprehensive review with emphasis on abiotic stress management. *Crop Design* 3(4): 100076. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.100076>
- Rocha-Santillano JJ, Sangerman-Jarquín DM, Preciado-Rangel P, De-la-O-Olán M, Fortis-Hernández M, Marquez-Guerrero SY, Flores-Hernández EA, Romero-Arenas O (2024) Impacto de nanopartículas de hidroxiapatita en los compuestos bioactivos y actividad enzimática en pimiento morrón. *Revista Fitotecnia Mexicana* 47(4): 369-375. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.4.369>
- Rocha-Santillano JJ, González-Torres A, Moreno-Reséndez A, Flores-Hernández EA, Garcia-Carrillo M, Ortiz-Díaz S, Preciado-Rangel P (2025) Impact of hydroxyapatite nanoparticles as a biostimulant in strawberry crop. *Revista Terra Latinoamericana* 43. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2198>
- Rodríguez-Jurado S, Guevara-González RG, Aguirre-Becerra H, Esquivel-Escalante K, Feregrino-Pérez AA (2025) Nanoparticles as potential eustressors in plants. *Agronomy* 15(9): 2186. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092186>
- Rojas-Pirela M, Carillo P, Lárez-Velásquez C, Romanazzi G (2024) Effects of chitosan on plant growth under stress conditions: similarities with plant growth promoting bacteria. *Frontiers in Plant Science* 15: 1423949. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1423949>
- Shahrajabian MH, Chaski C, Polyzos N, Tzortzakis N, Petropoulos SA (2021) Sustainable agriculture systems in vegetable production using chitin and chitosan as plant biostimulants. *Biomolecules* 11(6): 819. <https://doi.org/10.3390/biom11060819>
- Shi M, Gu J, Wu H, Rauf A, Emran TB, Khan Z, Mitra S, Aljohani ASM, Alhumaydhi FA, Al-Awthan YS, Bahattab O, Thiruvengadam M, Suleria HAR (2022) Phytochemicals, nutrition, metabolism, bioavailability, and health benefits in lettuce-a comprehensive review. *Antioxidants* 11(6): 1158. <https://doi.org/10.3390/antiox11061158>

- Singleton V, Orthofer R, Lamuela RM (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299(7): 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Twaij BM, Hasan MN (2022) Bioactive secondary metabolites from plant sources: types, synthesis, and their therapeutic uses. *International Journal of Plant Biology* 13(1): 4-14. <https://doi.org/10.3390/ijpb13010003>
- Wu P, Li B, Liu Y, Bian Z, Xiong J, Wang Y, Zhu B (2024) Multiple physiological and biochemical functions of ascorbic acid in plant growth, development, and abiotic stress response. *International Journal of Molecular Sciences* 25(3): 1832. <https://doi.org/10.3390/ijms25031832>
- Zhang F, Niu L, Li Y, Zhou X, Zhang H, Wu X, Liu H, Wang W (2025) Maize peroxidase ZmPrx25 Modulates apoplastic ROS homeostasis and promotes seed germination and growth under osmotic and drought stresses. *Antioxidants* 14(9): 1067. <https://doi.org/10.3390/antiox14091067>
- Zheng K, Lu J, Li J, Yu Y, Zhang J, He Z, Ismail OM, Wu J, Xie X, Li X (2021) Efficiency of chitosan application against *Phytophthora infestans* and the activation of defence mechanisms in potato. *International journal of biological macromolecules* 182: 1670-1680. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.097>
- Zhishen J, Mengcheng T, Jianming W (1999) Research on antioxidant activity of flavonoids from natural materials. *Food Chemistry* 64: 555-559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)