

EL NEODIMIO INCREMENTA EL CONTENIDO FOLIAR DE N, P Y K EN LECHUGA HIDROPÓNICA^a

NEODYMIUM INCREASES THE FOLIAR CONTENT OF N, P, AND K IN HYDROPONIC LETTUCE

Rueda-López, I.*; Trejo-Téllez, L.I.; Gómez-Merino, F.C.;
Peralta-Sánchez, M.G.

*Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5,
Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56264*

** E-mail: rueda.imelda@colpos.mx*

Fecha de envío: 31, mayo, 2025

Fecha de publicación: 20, septiembre, 2025

Resumen:

La lechuga (*Lactuca sativa*) es una de las hortalizas de hoja más cultivadas a nivel mundial. Debido a su alta demanda, su producción ha aumentado aproximadamente un 62%; sin embargo, el cambio climático afecta su rendimiento, lo que ha impulsado la búsqueda de estrategias innovadoras para optimizar su crecimiento. Algunos lantánidos, incluido el neodimio (Nd), han sido clasificados como bioestimulantes con potencial para incrementar la tolerancia al estrés abiótico y mejorar la productividad y calidad de los cultivos. En esta investigación se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de Nd (0, 20, 40 y 60 μM) en el contenido foliar de N, P y K de lechuga cv. Starfighter. Plántulas de 40 d de edad se cultivaron bajo condiciones de invernadero, en un sistema hidropónico de raíz flotante. Durante el ciclo de producción se realizaron cuatro aplicaciones de Nd mediante la solución nutritiva universal de Steiner. Después de 48 d de tratamiento se determinó el contenido nutrimental en el tejido foliar. Los resultados mostraron que la concentración de 60 μM de Nd incrementó significativamente los contenidos foliares de N, P y K. En conclusión, el suministro de Nd tuvo un efecto positivo en el estatus nutrimental de la lechuga cultivada en hidroponía.

Palabras clave: bioestimulantes inorgánicos, lantánidos, estatus nutrimental, *Lactuca sativa*.

^a Tesis

Abstract:

Lettuce (*Lactuca sativa*) is one of the most widely cultivated leafy vegetables worldwide. Due to its high demand, its production has increased by approximately 62%; however, climate change negatively affects its yield, driving the search for innovative strategies to optimize its growth. Some lanthanides, including neodymium (Nd), have been classified as biostimulants with the potential to enhance tolerance to abiotic stress and improve crop productivity and quality. This study evaluated the effect of different Nd concentrations (0, 20, 40, and 60 μM) on the foliar content of N, P, and K in lettuce cv. Starfighter. Forty-day-old seedlings were grown under greenhouse conditions using a floating root hydroponic system. During the production cycle, four Nd applications were carried out through the universal Steiner nutrient solution. After 48 days of treatment, the nutrient content in the leaf tissue was determined. The results showed that the 60 μM Nd treatment significantly increased the foliar contents of N, P, and K. In conclusion, Nd supply had a positive effect on the nutritional status of hydroponically grown lettuce.

Keywords: Inorganic biostimulants, lanthanides, nutrient status, *Lactuca sativa*.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas sostenibles para incrementar la productividad agrícola frente al cambio climático, la escasez de agua y el agotamiento de recursos naturales ha impulsado el uso de bioestimulantes vegetales. Estos compuestos, al promover el crecimiento y la tolerancia al estrés abiótico, representan una herramienta innovadora y ambientalmente amigable para mejorar el rendimiento de los cultivos (Petropoulos, 2020).

Entre los bioestimulantes emergentes destacan los elementos de tierras raras (ETR), un grupo de 17 elementos químicos que incluye al itrio (Y), escandio (Sc) y los lantánidos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu). En particular, los lantánidos han mostrado potencial como bioestimulantes inorgánicos capaces de inducir respuestas fisiológicas beneficiosas en diversas especies vegetales, tales como el incremento de la germinación, el desarrollo radicular y la síntesis de metabolitos secundarios (Zhang et al., 2013; Ayub et al., 2023; Trejo-Téllez et al., 2023).

El neodimio (Nd), miembro del grupo de los lantánidos, ha demostrado efectos positivos sobre la fisiología vegetal, aunque los estudios disponibles aún son limitados. Se ha reportado que su aplicación estimula la germinación, el crecimiento vegetativo, la síntesis de clorofilas, el desarrollo radicular y, en consecuencia, la calidad y rendimiento de los cultivos (Zhang et al., 2013; Abou El-Nour y Attia, 2022).

Asimismo, investigaciones recientes indican que el Nd favorece la absorción de elementos esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Ramírez-Antonio et al., 2023; Rueda-López et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Nd en el contenido de N, P y K en plantas de lechuga cv. Starfighter cultivadas en un sistema hidropónico de raíz flotante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El experimento se realizó en condiciones de invernadero, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en Montecillo, Estado de México (19.96° LN, 98.9° LO y 2244 m de altitud).

Material vegetal y condiciones de crecimiento

Plántulas de lechuga cv. Starfighter de 40 d de edad, se establecieron en un sistema hidropónico de raíz flotante, en contenedores de plástico de 900 mL de capacidad, con un sistema de oxigenación programado cada 3 h con tiempos de oxigenación de 15 min. La nutrición se suministró con la Solución Nutritiva Universal Steiner, durante los primeros 10 d a una concentración del 50%, posteriormente y hasta la cosecha se aportó al 100% (Steiner, 1984).

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Las dosis de Nd evaluadas fueron 0, 20, 40 y 60 μM , aplicado como $\text{NdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, Saint, MO, EE. UU.) a la solución nutritiva. La unidad experimental fue una planta de lechuga colocada en el contenedor antes descrito. Los tratamientos iniciaron en plantas de 50 d y fueron aplicados por 48 d, el agua evaporada se repuso cada 3 d. El pH de la solución se ajustó a 5.5 usando H_2SO_4 1 N.

Variables evaluadas

Al finalizar el ciclo de cultivo, se cosecharon las plántulas de lechuga. Las hojas se secaron en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125; Guadalajara, México) a 70 °C por 72 h, posteriormente el tejido seco se molió hasta obtener partículas menores a 2 mm.

Para la determinación de N se pesaron 0.25 g de cada muestra vegetal, que fueron sometidas a digestión húmeda con una mezcla biácida de $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HClO}_4$ (2:1, v:v) y 1 mL de H_2O_2 al 30%, en una plancha de digestión a 350 °C. Al finalizar la digestión, los extractos obtenidos se filtraron y se aforaron a 25 mL con agua desionizada. El N se evaluó con el método micro-Kjeldahl. Un volumen de 10 mL del extracto resultante se destiló adicionando NaOH al 50 %. El destilado se recibió en H_3BO_3 al 4 % con una mezcla de indicadores (rojo de metilo y verde de bromocresol), la titulación se realizó con H_2SO_4 0.05 N.

Para la cuantificación de P y K se pesaron 0.5 g de cada muestra vegetal, se adicionó una mezcla de $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (2:1, v:v) y se colocaron en una plancha de digestión a 160 °C. Posteriormente las muestras se filtraron y aforaron a 25 mL con agua desionizada. Las concentraciones de los elementos antes referidos se leyeron mediante espectroscopia de emisión óptica de inducción por plasma acoplado (Agilent, ICP-Optical Emission Spectrometer, 725-ES, Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Con los datos de la biomasa seca de las hojas y las concentraciones de N, P y K, se estimaron los contenidos de estos elementos.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el software estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2009) versión 9.4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta investigación, todos los niveles de Nd aplicados incrementaron el contenido foliar de los macronutrientes evaluados. En particular, el tratamiento 60 μM Nd provocó aumentos significativos en los contenidos de N, P y K del orden de 117.3, 108.4 y 64.1%, respectivamente, en comparación con el testigo (Figuras 1, 2 y 3).

Es importante destacar que, a medida que se aumenta la concentración de Nd en la solución nutritiva, el contenido de N en hoja se incrementa (Figura 1).

El N es un elemento esencial para el desarrollo vegetal, ya que forma parte estructural de proteínas, ácidos nucleicos, fosfolípidos y clorofila (Wang et al., 2024).

Se ha reportado que los lantánidos favorecen la reducción del nitrato y la asimilación del N al estimular la actividad de enzimas clave involucradas en su metabolismo,



como nitrato reductasa (NR), nitrito reductasa (NiR), glutamato sintasa (GOGAT), glutamina sintetasa (GS), glutamato deshidrogenasa (GDH), ureasa y transaminasa glutámico-pirúvica (TGP) (Cao et al., 2007; Yin et al., 2009). Este mecanismo enzimático podría explicar el incremento observado en el contenido foliar de N en las plantas de lechuga tratadas con Nd.

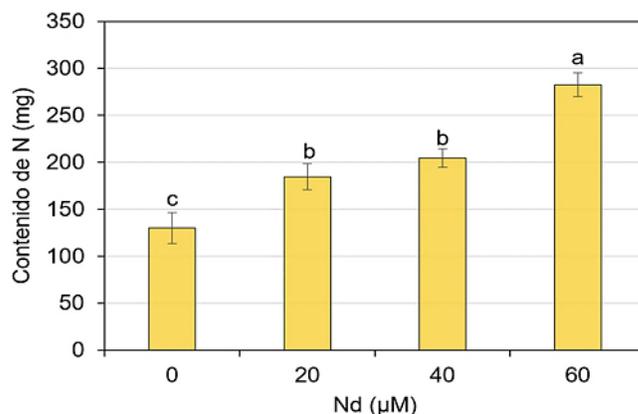


Figura 1. Contenido de nitrógeno foliar en lechuga Starfighter según concentración de neodimio (Nd). Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 1. Foliar nitrogen content in Starfighter lettuce according to neodymium (Nd) concentration. Different letters indicate statistically significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los resultados de este estudio, que muestran un incremento en el contenido foliar de P en respuesta a la aplicación de Nd (Figura 2), coinciden con reportes previos donde los lantánidos favorecen la absorción y asimilación de este nutriente (Ramírez-Antonio et al., 2023; Rueda-López et al., 2024). Se ha propuesto que este efecto está relacionado con la modulación de transportadores de fosfato o con la estimulación del metabolismo radicular, lo cual incrementa la eficiencia en la adquisición de P por parte de la planta.

En cuanto al potasio (K), los resultados revelan un efecto no lineal del Nd, observándose los mayores contenidos foliares a concentraciones de 20 y 60 μM . Este comportamiento sugiere que el Nd podría modificar de manera diferencial los mecanismos de transporte o acumulación de K en la planta, dependiendo de la concentración aplicada (Figura 3). Aunque los mecanismos precisos a través de los cuales el Nd influye en la dinámica del K no están completamente dilucidados, los

resultados obtenidos sugieren un potencial bioestimulante de este lantánido para optimizar el estatus nutrimental en lechuga.

Además, resultados similares fueron reportados en caña de azúcar (*Saccharum* spp.), donde la aplicación de 150 μM Nd incrementó significativamente el contenido de macronutrientes en distintos órganos de la planta (Ramírez-Antonio et al., 2023).

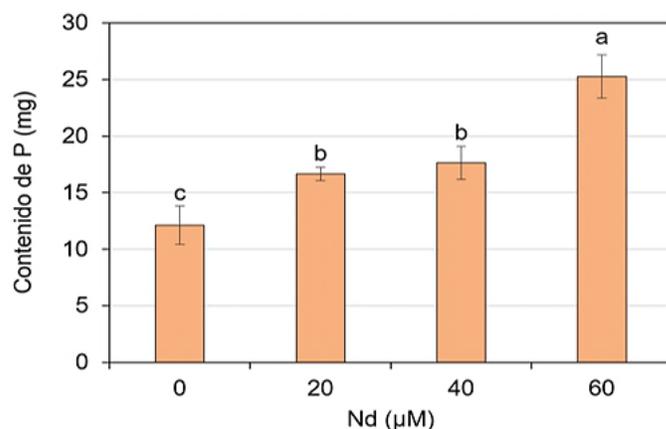


Figura 2. Contenido de fósforo foliar en lechuga Starfighter según concentración de neodimio (Nd). Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 2. Foliar phosphorus content in Starfighter lettuce according to neodymium (Nd) concentration. Different letters indicate statistically significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

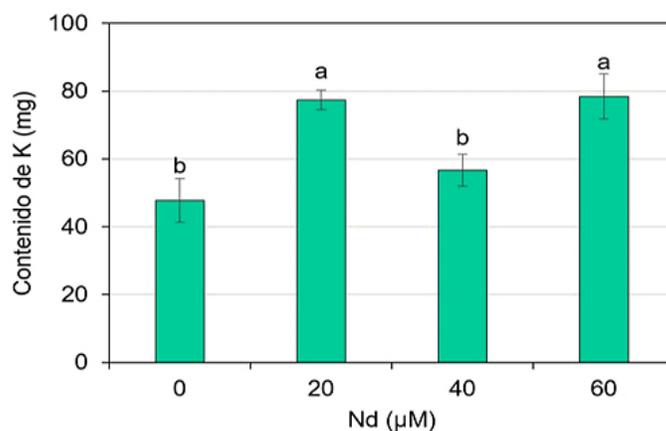


Figura 3. Contenido de potasio foliar en lechuga Starfighter según concentración de neodimio (Nd). Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 3. Foliar potassium content in Starfighter lettuce according to neodymium (Nd) concentration. Different letters indicate statistically significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el neodimio (Nd) puede ser una herramienta útil para mejorar el estatus nutrimental de la lechuga cultivada en hidroponía. El suministro de este elemento favoreció la acumulación de N, P y K en hojas, destacando el efecto positivo de la concentración 60 μM . En el caso de K, los resultados sugieren que el efecto del Nd depende de la dosis, lo que abre la posibilidad de ajustar su aplicación de manera estratégica. Estos hallazgos refuerzan la idea de que ciertos elementos inorgánicos, como los lantánidos, pueden funcionar como bioestimulantes y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles. Sin embargo, aún es necesario profundizar en los mecanismos involucrados para comprender mejor cómo el Nd influye en la nutrición de las plantas.

LITERATURA CITADA

- Abou El-Nour, H. H., & Attia, R. M. (2022). Evaluate the effects of rare earth elements on sweet pepper seeds germination process, seedlings growth and plants productivity. *GSC Advanced Research and Reviews*, 13(1), 023-038. doi.org/10.30574/gscarr.2022.13.1.0250
- Ayub, M. A., Abbas, M., & Rehman, M. Z. (2023). Role of inorganic bio stimulant elements in plant growth. In Aftab, T., & Hakeem, K. R. (eds.), *Sustainable Plant Nutrition* (pp. 229-261). Academic Press. doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00014-6
- Cao, R., Huang, X. H., Zhou, Q., & Cheng, X. Y. (2007). Effects of lanthanum (III) on nitrogen metabolism of soybean seedlings under elevated UV-B radiation. *Journal of Environmental Sciences*, 19(11), 1361-1366. doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60222-8
- Petropoulos, S. A. (2020). Practical applications of plant biostimulants in greenhouse vegetable crop production. *Agronomy*, 10(10), 1569. doi.org/10.3390/agronomy10101569
- Ramírez-Antonio, V. J., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., & Hidalgo-Contreras, J. V. (2023). Neodymium stimulates growth, nutrient concentration, and metabolism in sugarcane in hydroponics. *Sugar Tech*, 25, 1385-1395. doi.org/10.1007/s12355-023-01283-y
- Rueda-López, I., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Peralta-Sánchez, M. G., & Ramírez-Olvera, S. M. (2024). Neodymium and zinc stimulate growth, biomass accumulation and nutrient uptake of lettuce plants in hydroponics. *Folia Horticulturae*, 36(2), 283-297. doi.org/10.2478/fhort-2024-0017
- SAS Institute Inc. (2009). SAS/STAT software: Changes and enhancements, release 6.10, Cary, NC: SAS Institute Inc.

- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. Paper presented at 6th International Congress on Soilless Culture (pp. 633-650). Wageningen, Netherlands.
- Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Trejo, L.F., & Gómez-Merino, F.C. (2023). Biostimulant effects and concentration patterns of beneficial elements in plants. In Pandey, S., Tripathi, D. K., Singh, V. P., Sharma, S., & Chauhan, D. K. (eds.), *Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent Developments and Future Prospects* (pp. 58-102). doi.org/10.1002/9781119691419.ch4
- Wang, Q., Li, S., Li, J., & Huang, D. (2024). The utilization and roles of nitrogen in plants. *Forests*, 15(7), 1191. doi.org/10.3390/f15071191
- Yin, S., Ze, Y., Liu, C., Li, N., Zhou, M., Duan, Y., & Hong, F. (2009). Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. *Biological Trace Element Research*, 132, 247-258. doi.org/10.1007/s12011-009-8392-z
- Zhang, C., Li, Q., Zhang, M., Zhang, N., & Li, M. (2013). Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 3(1), 20-24. doi.org/10.1016/j.apsb.2012.12.005

