



## Niveles críticos N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y clorofila en hojas de lechuga en sistema de producción hidropónico

Giuliana Shelly Lizana FLORES <sup>\*1</sup>, Fredy Fernando Rivas YUPANQUI <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de cultivos y fitomejoramiento, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro del Perú, Junín, Perú.

\*E-mail: [shelly.lizana@unesp.br](mailto:shelly.lizana@unesp.br)

Enviado: 09/09/2025; Aceptado: 05/12/2025; Publicado: 14/01/2026.

**RESUMEN:** La producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistema hidropónico en el Valle del Mantaro requiere niveles óptimos de nitrógeno (N) para cumplir con los estándares de calidad establecidos por el Reglamento de la Comisión de la Unión Europea. Este estudio se desarrolló en el invernadero de la Estación Experimental Agropecuaria El Mantaro, Jauja, Perú; con el objetivo de determinar los niveles críticos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la savia del peciolo, en hojas de lechuga variedad Seda y clorofila foliar, así como identificar la concentración de N en la solución nutritiva que maximiza la producción sin superar los límites permisibles de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Se aplicaron tratamientos con 0,5, 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 y 22 mmol N L<sup>-1</sup>, con seis repeticiones. Los resultados indicaron que la concentración óptima de N en la solución nutritiva se sitúa entre 1,25 y 4,0 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que mejora significativamente el crecimiento, la producción y la calidad del cultivo. Los niveles críticos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fueron 3347,43 mg kg<sup>-1</sup> en hoja fresca, 482,54 mg L<sup>-1</sup> en la savia del peciolo y 2,12 µg g<sup>-1</sup> en clorofila, cumpliendo con el límite de 4500 mg kg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en peso fresco. Este estudio contribuye a optimizar la fertilización nitrogenada en hidroponía, asegurando la calidad y la seguridad alimentaria.

**Palabras clave:** nitrato; savia; calidad; producción; nutrición.

### Critical N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and chlorophyll levels in lettuce leaves grown hydroponically under forced air pressure

**ABSTRACT:** The production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under hydroponic systems in the Mantaro Valley requires optimal nitrogen (N) levels to meet quality standards established by the EU Commission Regulation. This study was conducted in the greenhouse of the El Mantaro Agricultural Experimental Station, Jauja, Peru, to determine the critical levels of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in petiole sap, in lettuce leaves (cv. Seda), and foliar chlorophyll, as well as identifying the N concentration in the nutrient solution that maximizes yield without exceeding the permissible limits of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Treatments of 0.5, 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, and 22 mmol N L<sup>-1</sup> were applied, with six replications. Results indicated that the optimal N concentration in the nutrient solution ranged between 1.25 and 4.0 mmol N L<sup>-1</sup>, significantly improving crop growth, yield, and quality. The critical levels of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were 3347.43 mg kg<sup>-1</sup> in fresh leaves, 482.54 mg L<sup>-1</sup> in petiole sap, and 2.12 µg g<sup>-1</sup> on chlorophyll, complying with the maximum limit of 4500 mg kg<sup>-1</sup> of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in fresh weight. This study contributes to optimizing nitrogen fertilization in hydroponic systems, ensuring product quality and food safety.

**Keywords:** nitrate; Savia; quality; production; nutrition.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistemas de producción hidropónica representa una alternativa eficiente y sostenible para la agricultura moderna, debido a su alta producción y uso racional de recursos. Se cultiva ampliamente a nivel mundial, especialmente en países de América, Asia, Australia y Europa. China registra la producción mundial con un 54,6% del total, seguida de los Estados Unidos de Norteamérica (14,3%) e India (4,1%) (SHATILOV et al., 2019).

En estos sistemas, el equilibrio de nutrientes en la solución nutritiva es fundamental para asegurar el desarrollo óptimo del cultivo, aportando los elementos esenciales, tanto macro como micronutrientes, en concentraciones óptimas para el crecimiento y el metabolismo de las plantas (SHARMA et al., 2018). Sin embargo, en la práctica, estas concentraciones pueden variar y desviarse de los rangos

óptimos debido a factores como la absorción diferencial de nutrientes por parte de la planta o la acumulación de sales en el sistema, lo que hace necesario un monitoreo y un ajuste constantes de la solución nutritiva (WADA, 2019).

Entre los nutrientes más críticos se encuentra el nitrógeno, cuya concentración debe mantenerse dentro de un rango fisiológicamente adecuado. Niveles deficientes pueden provocar desequilibrios nutricionales limitando el desarrollo y el rendimiento del cultivo, mientras que concentraciones excesivas pueden causar toxicidad y comprometer la calidad del producto (RAHMAN; ZHANG, 2018), ocasionar daños en la salud humana y pérdidas de carácter económico.

Indicadores como la concentración foliar de nitrato y de clorofila son clave para evaluar el estado nutricional de la planta y su capacidad fotosintética (HAN et al., 2023), aspectos estrechamente relacionados con la calidad y la producción del cultivo.

El nitrato es la principal fuente de nitrógeno disponible para las plantas en sistema de hidroponía, desempeñando un papel crucial en la formación de proteínas y otros metabolitos esenciales (KANT, 2018; LIU et al., 2024). Por lo tanto, la acumulación de nitratos en los tejidos foliares depende de factores ambientales y de manejo, como la intensidad y calidad de la luz, la temperatura y la disponibilidad de nitrógeno en la solución nutritiva (ESCOBAR-GUTIERREZ et al., 2002).

Cuando la absorción de nitratos por la planta supera su capacidad de asimilación, estos iones se almacenan en las vacuolas de las células, donde se acumulan como reserva temporal; esta situación es frecuente cuando la concentración de nitrógeno en la solución nutritiva es muy elevada. El nitrato en hortalizas de hojas es considerado relativamente no tóxico para la salud humana; no obstante, entre el 5 y 10% del nitrato ingerido se transforma en nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) en el tracto digestivo, una sustancia que puede resultar altamente tóxica y provocar problemas como el síndrome del bebé azul (metahemoglobinemia), cáncer gastrointestinal, problemas en el sistema cardiovascular y disfunción tiroidea (BRYAN, 2022; PINAFFI-LANGLEY et al., 2024).

Por lo tanto, mantener niveles críticos de nitrato (NCN) en los tejidos foliares es determinante para la producción óptima del cultivo, ya que deficiencias o excesos pueden afectar negativamente el metabolismo de la planta. Estos NCN en el cultivo de lechuga representan la concentración mínima de nitrato necesaria en los tejidos foliares de la planta para alcanzar el 90% de la máxima producción, que se determinan mediante estudios de respuesta a la fertilización nitrogenada, en los cuales se evalúa la relación entre las dosis de nitrógeno aplicadas y el rendimiento obtenido (FONTES et al., 1997). Por otro lado, la clorofila, como pigmento clave en la fotosíntesis, está estrechamente relacionada con la concentración de nitrógeno en la planta (HURTADO et al., 2011; CHO et al., 2024), ya que una nutrición nitrogenada balanceada favorece su síntesis y asegura una alta eficiencia fotosintética.

Los valores críticos de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N y N foliar en plantas de lechuga fueron determinados por Pritchard et al. (1995) en las etapas 7 y 9 del desarrollo foliar, con rangos de 7 a 11 g kg<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N y de 47 a 55 g kg<sup>-1</sup> de N en la materia seca (JONES et al., 1991). Por su parte, Fontes et al. (1997) registraron niveles críticos asociados al máximo rendimiento de lechuga en el estado octavo foliar, siendo estas: 1,837 mg kg<sup>-1</sup> clorofila en peso fresco y 4,27 g 100 g<sup>-1</sup> N en materia seca y en la cosecha: 6,361 mg kg<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N de peso seco; en el suelo, las concentraciones mínimas asociados al máximo peso seco de la planta fueron de 34 mg kg<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N (FONTES et al., 1997).

La ingesta diaria admisible de nitratos en alimentos ha sido establecida en 3,7 mg kg<sup>-1</sup> de peso corporal por el Comité Científico de la UE para la alimentación humana y el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (EUROPEAN COMMISSION, 2023; EUROSTAT, 2023). Debido a los riesgos potenciales para la salud, la Comisión Europea ha establecido límites máximos permitidos de nitratos en lechuga, diferenciando entre cultivos en invernadero (5000 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg<sup>-1</sup>) y en cultivo al aire libre (4000 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg<sup>-1</sup>) entre el 1 de octubre y el 31 de marzo. Estas regulaciones buscan reducir la exposición de los consumidores a niveles peligrosos de nitratos (EUROPEAN COMMISSION, 2023a).

Por lo tanto, en sistemas hidropónicos, la concentración de nitratos en cultivos de lechuga es desconocida en el Valle del Mantaro, Perú, donde la alta demanda de producción suele incentivar la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados. Por este motivo, el objetivo de esta investigación fue determinar los niveles críticos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y de clorofila en las hojas de lechuga que maximizan la producción, considerando los límites máximos permisibles de nitratos establecidos por la Comisión Europea.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El sistema hidropónico bajo condiciones de presión forzada de aire fue instalado en el Laboratorio de Microbiología de suelos de la Facultad de Agronomía, ubicado en la Estación Experimental Agropecuario (EEA) El Mantaro de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP), en Jauja-Junín (11°50'02"S 75°23'45"W, a una altitud de 3314 msnm).

### 2.2. Diseño experimental y condiciones de cultivo

Los tratamientos consistieron en nueve concentraciones de nitrógeno (N): 0,5; 1; 4; 7; 10; 13; 16; 19 y 22 mmol L<sup>-1</sup>, estructurados en un diseño experimental completamente aleatorizado con seis repeticiones.

La solución nutritiva siguió las concentraciones propuestas por Hoagland; Arnon (1950). Para la composición de N y K, se utilizaron KNO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> según los tratamientos. Se trasplantaron plántulas de lechuga de la variedad Seda con aproximadamente 24 días de germinación. Esta variedad se caracteriza por presentar cabeza pequeña y poco compacta, con hojas suaves y flexibles, de color verde claro a medio, de textura mantecosa, adaptada a las condiciones climáticas templadas de la zona.

Una bomba de aire de 115 V/60 Hz de la marca Millipore permitió generar presión, lo que favoreció la circulación de la solución nutritiva contenida en los vasos de PVC. El tiempo de circulación de la solución fue programado a 4 minutos, cada 2 horas, durante las 24 horas, utilizando un temporizador digital 220 Bivolt. El sistema estaba iluminado con focos led de 15000 lúmenes (250 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) (ZHANG et al., 2018), lo que permitió la iluminación desde las 6:00 h hasta las 18:00 h. No se registró la temperatura del ambiente; sin embargo, se estima que este factor no habría afectado el desarrollo de las plantas.

Cada unidad experimental, representada por una plántula de lechuga de almácigo, estaba contenida en un vaso de PVC de 4 L con la solución nutritiva.

### 2.3. Análisis químico de la solución nutritiva

Los análisis de pH y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva se realizaron semanalmente, controlando los valores de pH entre 6,0 - 7,2 y de CE entre 1,6 - 1,8 dS m<sup>-1</sup>, lo cual es concordante con Samarakoon et al. (2020). Estos resultados permitieron realizar un cambio en la solución nutritiva a los 20 días posteriores a la instalación del experimento.

Para la medición del pH, se utilizó un potenciómetro portátil STARTER OHAUS-ST20, con una precisión de ± 0,01 unidades de pH, y la CE se determinó con un conductímetro portátil STARTER 300C, con un margen de error de ± 0,5 % respecto al valor medido.

## 2.4. Conducción del experimento

El trabajo de investigación se dividió en cuatro etapas principales para garantizar un adecuado desarrollo del estudio: a) instalación del sistema de hidroponía, que consistió en la preparación e implementación del sistema para el cultivo de lechuga bajo condiciones controladas. b) Conducción del experimento: en esta fase, las plántulas de lechuga variedad Seda fueron trasplantadas a los 24 días de germinación y colocadas en pequeños vasos de plástico de 50 mL y 3 cm de diámetro, utilizados como contenedores individuales para cada plántula. A los 20 días de iniciada la conducción, se realizó un cambio total de la solución nutritiva, teniendo en cuenta los tratamientos de N aplicados en la instalación. Durante el desarrollo del experimento, se realizó un monitoreo semanal del pH y de la CE de la solución nutritiva para evitar la acidificación y el incremento de la concentración de sales. Adicionalmente, se registró el desarrollo vegetativo de las plantas y no se observó la presencia de plagas ni enfermedades. c) cosecha del cultivo de lechuga: esta etapa se llevó a cabo al final del crecimiento fenológico, que duró 45 días. d) análisis de nitrato y clorofila: se determinaron las concentraciones específicas de nitrato y clorofila en las plantas de lechuga.

## 2.5. Análisis de clorofila de las hojas

Un día antes de la cosecha, se seleccionaron dos hojas de envoltura por planta en la etapa de la octava hoja. Del tercio medio de cada hoja se extrajeron seis discos foliares.

Para la determinación de las clorofilas a y b (Cla y Clb), los discos foliares fueron triturados y macerados en un mortero, adicionando 5 mL del solvente orgánico etanol (96% v/v) a 85 °C durante 3 min (Berhe et al., 2024), y posteriormente centrifugados a 2000 × g durante 5 min. La determinación fue por métodos espectrofotométricos y las concentraciones se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$Cla = [13,95 \times A665 - 6,88 \times A649] \quad (01)$$

$$Clb = [24,95 \times A649 - 7,32 \times A665] \quad (02)$$

$$Cla + Clb = [6,63 \times A665 + 18,08 \times A649] \quad (03)$$

Para la cuantificación de clorofilas, las absorbancias se midieron a 665 nm (A665) y 649 nm (A649) utilizando un espectrofotómetro UV/Visible Thermo Scientific™ GENESYS™ 150.UV/Visible.

## 2.5. Análisis de N-nitrato

En la cosecha (cuarenta y cinco días después del trasplante), las plantas fueron seccionadas y separadas en parte aérea y raíz y todas las fracciones se pesaron en fresco.

Para la determinación de la concentración de nitratos en tejido fresco, las muestras fueron pesadas y hervidas durante 20 min; el extracto se llevó a un volumen de 50 mL; después de centrifugar durante 15 min a 5000 × g, el sobrenadante se guardó para su análisis posterior. Para el análisis de la savia, se extrajo del peciolo mediante una ligera presión manual.

Para los análisis de nitrato en tejido fresco y savia del peciolo, se tomaron 0,2 mL de alícuota, mezclando con 0,8 mL de ácido salicílico (5% p/v) en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado; luego de 20 min se añadió 19 mL de NaOH 2 N, para luego ser determinados la absorbancia a 410 nm de longitud de onda en un espectrofotómetro UV/Visible Thermo Scientific™ GENESYS™ 150.UV/Visible. El blanco consistió en 0,8 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (con ácido salicílico) y 19 mL de NaOH 2 N

(CATALDO, 1975). Las concentraciones fueron calculadas en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mg kg<sup>-1</sup> de peso fresco.

## 2.6. Determinación de los niveles críticos

El peso fresco de la parte aérea de la planta se determinó mediante el método gravimétrico, pesando inmediatamente después de la cosecha en una balanza analítica de cuatro dígitos de precisión.

Para la determinación de NiCr se ajustaron ecuaciones de regresión relacionando las variables: biomasa fresca de la parte aérea, concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en tejido fresco y savia de peciolo y concentración de clorofila con las concentraciones de N en la solución nutritiva (ALVAREZ, 1985); con esos datos se estimaron las dosis de N necesarias para alcanzar el 90% de la máxima producción; para estimar los valores críticos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en tejido fresco y savia y clorofila, se introdujo en el modelo con mejor ajuste, previamente calculado la dosis de N asociada con el 90% del peso fresco máximo de las plantas, procedimiento de acuerdo con Sampaio et al. (1995) y Fontes et al. (1997). La máxima eficiencia física (MEF), que es la concentración de N en la solución nutritiva para la máxima producción de biomasa fresca de la parte aérea de plantas de lechuga, fue calculada de acuerdo con el modelo de regresión cúbica raíz entre las dosis de N en la solución nutritiva y la biomasa fresca de la parte aérea (Figura 1).

Para la selección de las ecuaciones de regresión se eligieron los modelos con un coeficiente angular significativo (p>0,05) y los coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) más altos.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Efecto del N sobre la biomasa fresca de la parte aérea

En la Figura 1 se ilustra la influencia de las dosis de nitrógeno de la solución nutritiva sobre la producción de biomasa fresca de la parte aérea de las plantas de lechuga cultivadas en un sistema hidropónico. Se evidencia que al aumentar la dosis de N también se incrementa la biomasa fresca de la parte aérea. El modelo de regresión cúbico-raíz resulta altamente significativo en el análisis de los componentes del modelo, y el coeficiente de determinación sugiere que el 92,87% de la variabilidad en la producción de biomasa fresca de lechuga se atribuye a las variaciones en las dosis de nitrógeno aplicadas a la solución nutritiva.

La producción máxima de biomasa fresca de la parte aérea fue de 64,54 g planta<sup>-1</sup>, asociada a una dosis de 4,0 mmol N L<sup>-1</sup> en la solución nutritiva. En comparación, la dosis mínima de nitrógeno aplicada fue de 0,5 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que se tradujo en una producción de 44,48 g planta<sup>-1</sup>. Desde esta dosis mínima, se observó un aumento gradual de la producción con el incremento de las dosis de N, hasta alcanzar un máximo de 64,54 g planta<sup>-1</sup>. Sin embargo, tras alcanzar este máximo, la producción de biomasa fresca comenzó a declinar significativamente con el aumento de las dosis de N.

### 3.2. Concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en tejidos foliares de lechuga

El análisis de la relación entre las dosis de N aplicadas a la solución nutritiva y la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en los tejidos foliares de la lechuga (hojas frescas y savia del peciolo) mostró que el modelo de regresión cúbica se ajustó mejor a los datos experimentales.

## Niveles críticos N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y clorofila en hojas de lechuga en sistema de producción hidropónico

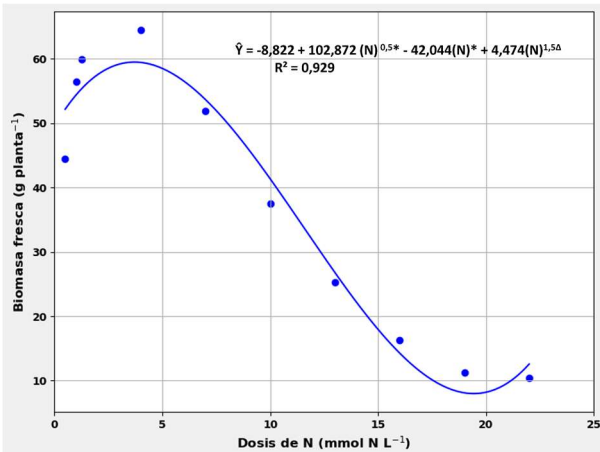


Figura 1. Producción de biomasa fresca de la parte aérea del cultivo de lechuga en función de las dosis de N adicionadas a la solución nutritiva. Nivel de confianza estadística:  $\Delta 90\%$ ,  $^*95\%$ .

Figure 1. Fresh biomass production of the aerial part of the lettuce crop as a function of the doses of N added to the nutrient solution. Statistical confidence level:  $\Delta 90\%$ ,  $^*95\%$ .

En el tejido fresco (Figura 2A), la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a una dosis de 0,5 mmol N L<sup>-1</sup> fue de 3467,26 mg kg<sup>-1</sup>; al incrementar el nivel de N en la solución nutritiva, la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pasó a 3347,43 mg kg<sup>-1</sup> con 1,25 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que representa un descenso del 3,45%. A partir de esa dosis, la concentración aumentó de manera pronunciada, alcanzando un máximo de 11164,68 mg kg<sup>-1</sup> con 18 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que representa un incremento del 233,53% respecto al valor registrado con 1,25 mmol N L<sup>-1</sup>. Posteriormente, se evidenció una tendencia decreciente.

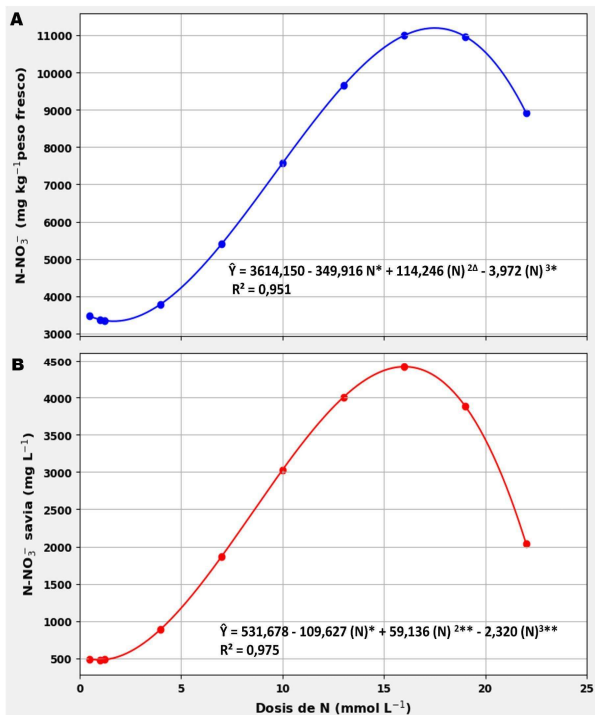


Figura 2. Concentración foliar de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en hoja fresca (A) y en savia del pecíolo (B) del cultivo de lechuga, en función de las dosis de N adicionadas a la solución nutritiva. Nivel estadístico de confianza:  $\Delta 90\%$ ,  $^{**}99,9\%$ .

Figure 2. Foliar concentration of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in fresh leaf (A) and in petiole sap (B) of lettuce cultivation, as a function of the N doses added to the nutrient solution. Statistical confidence level:  $\Delta 90\%$ ,  $^{**}99,9\%$ .

En la savia del pecíolo (Figura 2B), la concentración inicial de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fue de 491,36 mg L<sup>-1</sup>, equivalente a 0,5 mmol N L<sup>-1</sup>. Con 1 mmol N L<sup>-1</sup>, la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> disminuyó en un 2,54% respecto a la dosis anterior, hasta alcanzar 478,87 mg L<sup>-1</sup>. A partir de este punto, la concentración aumentó de manera sostenida hasta 4412,89 mg L<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, con 18 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que corresponde a un incremento del 821,53% respecto al valor de 1 mmol N L<sup>-1</sup>. Posteriormente, se observó una disminución del 53,86%, registrándose 2036,10 mg L<sup>-1</sup> con 22 mmol N L<sup>-1</sup>.

Estos resultados evidencian que el aumento progresivo de la dosis de N en la solución nutritiva favoreció inicialmente la acumulación de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> tanto en el tejido foliar fresco como en la savia del pecíolo, hasta alcanzar un punto máximo de 18 mmol N L<sup>-1</sup>, a partir de esa dosis de N se produce una reducción en las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, eso posiblemente está asociada a mecanismos fisiológicos de regulación interna o a efectos de saturación en la absorción y asimilación del nitrógeno.

### 3.3. Concentración foliar de clorofila a + b

La concentración de clorofila a + b del cultivo de lechuga respondió a las dosis de N en la solución nutritiva siguiendo un modelo cuadrático.

En la Figura 3, observamos que la concentración de clorofila aumentó a medida que se incrementó la dosis de N en la solución nutritiva, mostrando un ascenso de más del 100% al pasar de 0,5 mmol N L<sup>-1</sup> (1,60  $\mu\text{g g}^{-1}$  de clorofila a + b) a 6,83  $\mu\text{g g}^{-1}$  con 16,0 mmol N L<sup>-1</sup>. Sin embargo, a partir de esa dosis de N se observó una disminución de las concentraciones de clorofila, lo que sugiere un posible efecto negativo del exceso de nitrógeno.

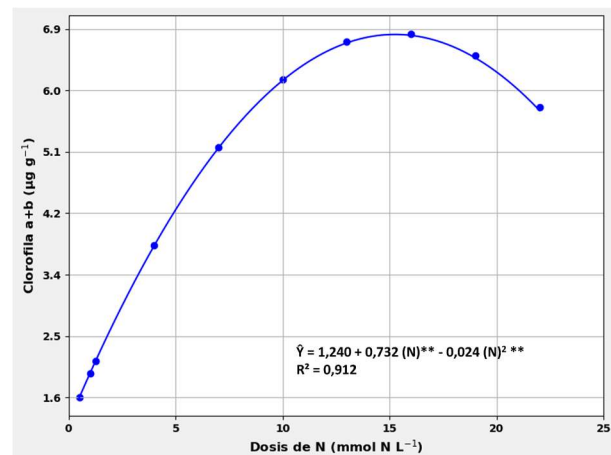


Figura 3. Concentración foliar de clorofila a + b en el cultivo de lechuga en función de las dosis de N adicionadas a la solución nutritiva. Nivel de confianza estadística:  $^{**}99,9\%$ ,  $^{**}$ .

Figure 3. Foliar concentration of chlorophyll a + b in lettuce cultivation as a function of the doses of N added to the nutrient solution. Statistical confidence level:  $^{**}99,9\%$ .

### 3.4. Niveles críticos de nitrógeno y clorofila

El análisis del contenido foliar de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en hoja fresca, en savia de pecíolo y en clorofila permitió identificar el NiCr en el cultivo de lechuga (Tabla 1). La concentración crítica se registró a una dosis de 1,21 mmol N L<sup>-1</sup>, correspondiente a una concentración foliar de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 3347,43 mg g<sup>-1</sup> para tejido fresco, 482,540 mg L<sup>-1</sup> para savia de pecíolo y 2,12  $\mu\text{g g}^{-1}$  para clorofila foliar, lo que indica el umbral mínimo necesario para mantener una producción adecuada de

biomasa sin limitar el crecimiento por deficiencia y toxicidad de nitrógeno.

Por otro lado, la MEF se alcanzó con una dosis de 2,78 mmol N L<sup>-1</sup>, asociada a una concentración foliar de 3438,79 mg kg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en tejido fresco, 633,93 mg L<sup>-1</sup> en savia de peciolo y 3,09 µg g<sup>-1</sup> de clorofila. Estos valores representan el punto óptimo en el que la planta aprovecha eficientemente el nitrógeno suministrado, generando la mayor cantidad de biomasa seca por unidad de N aplicado.

Tabla 1. Niveles críticos y máxima eficiencia física de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en tejido fresco, savia de peciolo y clorofila.

Table 1. Critical levels and maximum physical efficiency of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in fresh tissue, petiole sap and chlorophyll.

Determinación	Nivel crítico de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y clorofila	Concentración de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y clorofila para la MEF
Tejido fresco	3347,43 (mg kg <sup>-1</sup> )	3438,79 (mg kg <sup>-1</sup> )
Savia de peciolo	482,54 (mg L <sup>-1</sup> )	633,92 (mg L <sup>-1</sup> )
Clorofila	2,12 (µg g <sup>-1</sup> )	3.09 (µg g <sup>-1</sup> )

#### 4. DISCUSIÓN

Diversos estudios han demostrado que el incremento de N en la solución nutritiva puede mejorar significativamente la producción de biomasa en cultivos de lechuga. Por ejemplo, el estudio realizado por Thapa et al. (2022) demostró que el peso fresco de la lechuga aumentó con el incremento de los niveles de N en la solución nutritiva, alcanzando un peso fresco máximo de 38 g planta<sup>-1</sup> a una concentración de 10 mmol N L<sup>-1</sup>. Zhang et al. (2021) obtuvieron un mayor peso de la biomasa fresca del cultivo de lechuga (16,87 g planta<sup>-1</sup>) a una dosis de 12 mmol N L<sup>-1</sup>; por el contrario, a dosis de N en la solución considerablemente elevadas no se observó un mayor crecimiento del cultivo (LAWLOR, 2002). De ahí que el manejo adecuado de los fertilizantes nitrogenados sea esencial para el crecimiento óptimo del cultivo (BOROUJERDIA; ANSARI, 2007). Sin embargo, es importante señalar que, aunque el N y otros nutrientes son fundamentales para el rendimiento de las hortalizas de hoja, las concentraciones excesivas pueden tener efectos adversos, afectando tanto el rendimiento como la calidad del cultivo. Al igual que se observó en la Figura 1, para la dosis máxima de N aplicada (22,0 mmol N L<sup>-1</sup>), la producción disminuyó a 10,43 g planta<sup>-1</sup>, lo que representa un descenso del 83,84% en la producción de biomasa fresca de la parte aérea.

Por otro lado, la absorción de nitrógeno por la lechuga en un sistema hidropónico es un proceso crucial para su crecimiento y desarrollo, ya que este elemento es esencial para la producción de biomasa. En este tipo de sistemas, el nitrógeno se encuentra principalmente en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, una de las formas químicas más disponibles y fácilmente asimilables para las plantas. Las raíces de la lechuga absorben activamente el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de la solución nutritiva mediante un mecanismo de intercambio protón/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> acoplado (WANG et al., 2018). Este proceso requiere de transportadores específicos (NRT1 y NRT2) que promueven la absorción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y permiten su transporte y distribución entre las células, tejidos y órganos (GOYAL et al., 1986; WANG et al., 2018; MAGRAY et al., 2022). Una vez absorbido, el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es translocado y reducido en el citoplasma por la enzima nitrato reductasa (NR) a nitrito, que luego es transportado al cloroplasto y reducido a amonio mediante la enzima nitrito

reductasa (NiR). Este amonio se incorpora a los aminoácidos mediante un ciclo de asimilación (GS/GOGAT), esencial para el crecimiento de la planta. Factores ambientales como la luz, la concentración de nitrato y determinados metabolitos regulan la actividad de estas enzimas y afectan la eficiencia de la absorción y asimilación de N (Magray et al., 2022), lo cual resulta crucial para el desarrollo del cultivo de lechuga.

Wenceslau et al. (2021), mencionó, a medida que aumentan las concentraciones de nitrato en la solución nutritiva, se observa una mayor actividad de esta enzima NiR, la cual es fundamental para la reducción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el metabolismo vegetal, ya que el NiR es inducida directamente por la presencia de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, un hecho respaldado por estudios de Kawachi (2002), así mismo Thapa et al. (2024) resaltó que, el aumento de nitrato en la solución, genera una acumulación excesiva de este ion en las hojas del cultivo.

Los resultados obtenidos en este estudio también coinciden con los de Sahin y Dincer (2022), quienes reportaron que el contenido de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en hojas de lechuga aumenta significativamente (p < 0,01) al incrementarse las dosis de nitrógeno. En sus resultados, las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fueron de 1213, 1541 y 1935 mg kg<sup>-1</sup> a 50, 100 y 150 ppm de N, respectivamente. En investigaciones realizadas por Rodríguez et al. (2023) en cultivos de melón, se observó que, a medida que aumentaba la cantidad de N en la solución, los niveles de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la savia del peciolo aumentaron progresivamente, lo que concuerda con el trabajo de Lu et al. (2022). Del mismo modo, para Llanderal et al. (2020), indicaron que, la elevada concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la savia puede atribuirse al exceso de nitrato en la solución nutritiva, consecuencia del alto uso de fertilizantes nitrogenados, lo que coincide con lo observado por Fontes; Ronchi (2002), quienes hallaron una relación positiva entre el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la solución nutritiva y en la savia del peciolo. Sin embargo, la planta tiene una capacidad de almacenamiento limitada; cuando se alcanza un umbral de saturación en las células, las hojas empiezan a regular la absorción para evitar una acumulación excesiva (Figura 2).

Este fenómeno obedece a un mecanismo interno de control mediante el cual, al alcanzar concentraciones elevadas de nitrato, la planta limita la absorción de este nutriente para prevenir efectos tóxicos o estrés metabólico que puedan afectar su calidad y su desarrollo. Esta autorregulación de la absorción se refleja en los valores observados del contenido foliar de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, a partir de los cuales fue posible identificar el NiCr y la MEF del N en el cultivo de lechuga. El NiCr se registró con una dosis de 1,25 mmol N L<sup>-1</sup>, equivalente a una concentración foliar de 3347,48 mg kg<sup>-1</sup>, lo que indica el umbral mínimo necesario para mantener una producción adecuada de biomasa sin limitar el crecimiento por deficiencia de nitrógeno. De acuerdo con la Comisión Europea, se establece que la ingesta diaria de nitratos para una persona de 70 kg no debe superar los 259 mg. En 2023, se fijó un límite máximo de 4500 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg<sup>-1</sup> en lechugas cultivadas en invernadero y los resultados obtenidos se encuentran dentro del límite seguro definido por esta normativa europea.

El N, además de su papel en la síntesis de aminoácidos y proteínas, es un elemento directamente asociado a la fotosíntesis al influir en la formación de clorofila, un proceso fundamental que ocurre en los cloroplastos. Su disponibilidad foliar se asocia con la concentración de clorofila, la extensión del área foliar y la eficiencia fotosintética, por lo que este pigmento constituye un

indicador clave del estado nutricional de la planta. Por otra parte, la deficiencia de N afecta negativamente estos parámetros, lo que disminuye la productividad del cultivo (MAHLANGU et al., 2016; FATHI; ZEIDALI, 2021; FARJANA et al., 2023).

El modelo cuadrático observado en el análisis de clorofila (Figura 3) sugiere un punto de saturación a partir del cual una mayor concentración de N ya no se traduce en un aumento proporcional de clorofila, en conformidad con Samborski et al. (2009), quienes indicaron que el exceso de N no es completamente aprovechado bajo condiciones de alta disponibilidad de N. Jung et al. (2025) y Thapa et al. (2022) también observaron que el contenido total de N y clorofila tiende a aumentar linealmente con mayores concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la solución nutritiva. Sin embargo, Mahlangu et al. (2016) demostraron que concentraciones de N entre 100 y 120 mg L<sup>-1</sup> son suficientes para mantener una fotosíntesis eficiente, sin necesidad de mayores aportes.

La disminución de la clorofila a altas dosis de N puede deberse a la inhibición de su síntesis o al aumento de la actividad de la clorofilasa, enzima responsable de su degradación (BEN-YAAKOV et al., 2006; KRAJ, 2015). Además, un exceso de N puede generar desequilibrios nutricionales, afectando elementos como el potasio y el magnesio, esenciales para la estabilidad de la molécula de clorofila. Según Epstein; Bloom (2005), un equilibrio nutricional adecuado es crucial para mantener la eficiencia fotosintética y la calidad de la planta.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de un manejo eficiente de N en el sistema de producción hidropónico, priorizando un equilibrio nutricional que maximice el rendimiento sin comprometer la calidad del cultivo ni la inocuidad alimentaria.

## 5. CONCLUSIONES

Para las condiciones estudiadas, la producción de lechuga hidropónica en fresco aumentó con el incremento de la dosis de N de la solución nutritiva hasta 2,78 mmol L<sup>-1</sup>; a partir de esa concentración, disminuyó.

Los niveles críticos en la etapa de octava hoja de plantas de lechuga variedad Seda, asociados con la biomasa fresca, fueron: 3347,43 mg kg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en peso fresco, 482,54 mg L<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en savia de pecíolo y 2,12 µg g<sup>-1</sup> de clorofila foliar. El nivel crítico de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foliar en lechuga cultivada hidropónicamente fue de 3347,43 mg kg<sup>-1</sup> con una dosis de 1,25 mmol N L<sup>-1</sup>, lo que es inferior al límite permisible establecido por la Comisión Europea (4500 mg kg<sup>-1</sup> para lechuga de invierno).

## 6. REFERENCIAS

ALVAREZ, V. **Avaliação da fertilidade do solo: superfície de resposta-modelos aproximativos para expressar a relação fator resposta**. Viçosa. UFV, 1985. 75p.

BEN-YAAKOV, E.; HARPAZ-SAAD, S.; GALILI, D.; EYAL, Y.; GOLDSCHMIDT, E. The relationship between chlorophyllase activity and chlorophyll degradation during the course of leaf senescence in various plant species. **Israel Journal of Plant Sciences**, v. 54, n. 2, p. 129-135, 2006. [https://doi.org/10.1560/IJPS\\_54\\_2\\_129](https://doi.org/10.1560/IJPS_54_2_129)

BERHE, M.; YOU, J.; DOSSA, K.; LI, D.; ZHOU, R.; ZHANG, Y.; WANG, L. Examining chlorophyll

extraction methods in sesame genotypes: uncovering leaf coloration effects and anatomy variations. **Plants**, v. 13, n. 12, e1589, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13121589>

BOROUJERDIA, M.; ANSARI, N. A. Effect of different levels of nitrogen fertilizer and cultivars on growth, yield and yield components of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Biotechnology**, v. 1, n. 2, p. 47-53, 2007.

BRYAN, N. S. Inorganic Nitrate and Nitrite: Dietary Nutrients or Poisons?. In: TSADILAS, C. (Ed.). **Nitrate Handbook: environmental, agricultural and health effects**. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 357-373.

CATALDO D. A. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 6, n. 1, p. 71-80, 1975. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>

CHO, Y. B.; BOYD, R. A.; REN, Y.; LEE, M. S.; JONES, S. I.; RUIZ-VERA, U. M.; ORT, D. R. Reducing chlorophyll levels in seed-filling stages results in higher seed nitrogen without impacting canopy carbon assimilation. **Plant, Cell & Environment**, v. 47, n. 1, p. 278-293, 2024. <https://doi.org/10.1111/pce.14737>

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2<sup>nd</sup> Ed. Oxford: Sinauer Associates, 2005. 380p.

ESCOBAR-GUTIERREZ, A.; BURNS, I. G.; LEE, A.; EDMONDSON, R. N. Screening lettuce cultivars for low nitrate content during summer and winter production. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 77, n. 2, p. 232-237, 2002. <https://doi.org/10.1080/14620316.2002.11511485>

EUROPEAN COMMISSION. **Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006**. Official Journal of the European Union, v. 119, p. 103-157, 2023b. Available on: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj>. Accessed at: 09 Dec. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Reports of the scientific committee for food (thirty-eighth series). opinions of the scientific committee for food on: nitrates and nitrite**. Brussels, Belgium: European Commission Directorate-General Industry, 1997; Available on: [https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-12/sci-com\\_scf\\_reports\\_38.pdf](https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-12/sci-com_scf_reports_38.pdf). Accessed at: 09 Dec. 2025.

EUROSTAT. Online Publications: **Agriculture Statistical Publications**. Available online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Online\\_publications](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Online_publications). Accessed on: 26 Mar. 2023.

FARJANA, S.; PARK, I. S.; CHOI, J. M. Impact of controlled nitrogen application in water solution on seedling growth, tissue and soil nutrient concentrations in vegetative propagation of strawberry. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 64, n. 1, p. 41-50, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00460-4>

FATHI, A.; ZEIDALI, E. Conservation tillage and nitrogen fertilizer: a review of corn growth and yield and weed management. **Central Asian Journal of Plant Science Innovation**, v. 1, n. 3, p. 121-142, 2021. <https://doi.org/10.22034/CAJPSI.2021.03.01>

FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G.; CONDE, R. M. Critical chlorophyll, total nitrogen, and nitrate-nitrogen in

- leaves associated to maximum lettuce yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 20, n. 9, p. 1061-1068, 1997. <https://doi.org/10.1080/01904169709365318>
- FONTES, P. C. R.; RONCHI, C. P. Critical values of nitrogen indices in tomato plants grown in soil and nutrient solution determined by different statistical procedures. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1421-1429, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001000010>
- GOYAL, S. S.; HUFFAKER, R. C. The uptake of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> by intact wheat (*Triticum aestivum*) seedlings: I. Induction and kinetics of transport systems. **Plant Physiology**, v. 82, n. 4, p. 1051-1056, 1986. <https://doi.org/10.1104/pp.82.4.1051>
- HAN, K.; ZHANG, J.; WANG, C.; YANG, Y.; CHANG, Y.; GAO, Y.; XIE, J. Changes in growth, physiology, and photosynthetic capacity of spinach (*Spinacia oleracea* L.) under different nitrate levels. **Plos One**, v. 18, n. 3, p. e0283787, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283787>
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experiment Station, Circular**, v. 347, p. 1-32, 1950.
- HURTADO, S. M. C.; RESENDE, Á. V. D.; SILVA, C. A.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, v. 41, p. 1011-1017, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000074>
- JONES, J. B.; WOLF, B.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide**. Atlanta, USA: Micro Macro Intl, 1991. 609p.
- JUNG, D. H.; CHOI, S.; LEE, J. Changes in the growth, photosynthesis, and nitrogen allocation characteristics of hydroponically grown lettuce under different nitrate levels in a nutrient solution. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 66, n. 1, p. 163-172, 2025. <https://doi.org/10.1007/s13580-024-00645-z>
- KANT, S. Understanding nitrate uptake, signaling and remobilization for improving plant nitrogen use efficiency. **Seminars in cell & developmental biology**, v. 74, p. 89-96, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.034>
- KAWACHI, T.; SHOJI, Y.; SUGIMOTO, T.; OJI, Y.; KLEINHOF, A.; WARNER, R. L.; OHTAKE, N.; OHYAMA, T.; SUEYOSHI, K. Role of xylem sap nitrate in the regulation of nitrate reductase gene expression in leaves of barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 48, n. 1, p. 79-85, 2002. <https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409174>
- KRAJ, W. Chlorophyll degradation and the activity of chlorophyllase and Mg-dechelataze during leaf senescence in *Fagus sylvatica*. **Dendrobiology**, n. 74, 2015. <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.074.005>
- LAWLOR, D. W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 370, p. 773-787, 2002. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.773>
- LIU, H.; WU, Z.; ZHANG, W.; WANG, L.; LI, Z.; LIU, H. Synergistic effect between green light and nitrogen concentration on nitrate primary metabolism in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 328, e112848, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112848>
- LLANDERAL, A.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; PÉREZ-ALONSO, J.; CONTRERAS, J. I.; SEGURA, M. L.; RECA, J.; LAO, M. T. Approach to petiole sap nutritional diagnosis method by empirical model based on climatic and growth parameters. **Agronomy**, v. 10, n. 2, e188, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020188>
- LU, Q.; MILES, C.; TAO, H.; DEVETTER, L. Evaluation of real-time nutrient analysis of fertilized raspberry using petiole sap. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, e918021, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918021>
- MAGRAY, J. A.; ZARGAR, S. A.; ISLAM, T.; JAVID, H. Factors affecting nitrogen uptake, transport, and assimilation. In: YOUSUF, P. Y.; SHABIR, P. A.; HAKEEM, K. R. **Advances in plant nitrogen metabolism**. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 69-85.
- MAHLANGU, R. I. S.; MABOKO, M. M.; SIVAKUMAR, D.; SOUNDY, P.; JIFON, J. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 12, p. 1766-1775, 2016. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187739>
- PINAFFI-LANGLEY, A. C.; DAJANI, R. M.; PRATER, M. C.; NGUYEN, H. V. M.; VRANCKEN, K.; HAYS, F.; HORD, N. G. Dietary nitrate from plant foods: a conditionally essential nutrient for cardiovascular health. **Advances in Nutrition**, v. 15, n. 1, e100158, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.100158>
- PRITCHARD, K. H.; DOERGE, T. A.; THOMPSON, T. L. Evaluation of in-season nitrogen tissue tests for drip irrigated leaf and romaine lettuce. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, p. 237-257, 1995. <https://doi.org/10.1080/00103629509369293>
- RAHMAN, A.; ZHANG, D. Effects of fertilizer broadcasting on the excessive use of inorganic fertilizers and environmental sustainability. **Sustainability**, v. 10, n. 3, e759, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10030759>
- RODRÍGUEZ, A.; PEÑA-FLEITAS, M. T.; PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; THOMPSON, R. B. Effect of cultivar on measurements of nitrate concentration in petiole sap and leaf N content in greenhouse soil-grown cucumber, melon, and sweet pepper crops. **Scientia Horticulturae**, v. 320, e112200, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112200>
- SAHIN, S.; DINCER SECKIN, S. Effects of different LED light and nitrogen application on growth of lettuce plants and leaf nitrate content. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 16, p. 2523-2533, 2022. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2064292>
- SAMARAKOON, U.; PALMER, J.; LING, P.; ALTLAND, J. Effects of electrical conductivity, pH, and foliar application of calcium chloride on yield and tipburn of *Lactuca sativa* grown using the nutrient-film technique. **HortScience**, v. 55, n. 8, p. 1265-1271, 2020. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15070-20>
- SAMBORSKI, S. W. M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 4, p. 800-816, 2009. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0162Rx>

- SAMPAIO, R.; de FREITAS, J.; RIVAS, Y. F.; FONTES, P.; MARTÍNES, H.; PEREIRA, P. Níveis críticos de N-NO<sub>3</sub> e N-orgânico em pecíolos de tomateiro de crescimento determinado. **Revista Ceres**, v. XLII, n. 242, p. 444-452. 1995.
- SHARMA, N.; ACHARYA, S.; KUMAR, K.; SINGH, N.; CHAURASIA, O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 17, n. 4, p. 364-371, 2018. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- SHATILOV, M. V.; RAZIN, A. F.; IVANOVA, M. I. Analysis of the world lettuce market. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, e012053, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>
- THAPA, B.; BHANDARI, P.; RIYA, G. C.; ACHARYA, Y.; PHUYAL, S. Application of Hydroponic System. **KEC Journal of Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 33-37, 2024. <https://doi.org/10.3126/kjse.v8i1.69262>
- THAPA, U.; NANDI, S.; RAI, R.; UPADHYAY, A. Effect of nitrogen levels and harvest timing on growth, yield and quality of lettuce under floating hydroponic system. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 17, p. 2563-2577, 2022. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2064299>
- WADA, T. Theory and technology to control the nutrient solution of hydroponics. In: ANPO, M.; FUKUDA, H.; WADA, T. **Plant factory using artificial light: adapting to environmental disruption and clues to agricultural innovation**. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 5-14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00001-4>
- WANG, Y. Y.; CHENG, Y. H.; CHEN, K. E.; TSAY, Y. F. Nitrate transport, signaling, and use efficiency. **Annual review of Plant Biology**, v. 69, n. 1, p. 85-122, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040056>
- WENCESLAU, D. D. S. L.; OLIVEIRA, D. F. de; RABELO, H. de O.; FERBONINK, G. F.; GOMES, L. A. A.; LEONEL, É. C. A.; CAIONE, G. Nitrate concentration and nitrate/ammonium ratio on lettuce grown in hydroponics in Southern Amazon. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, n. 6, p. 862-868, 2021. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15087>
- ZHANG, X.; HE, D.; NIU, G.; YAN, Z.; SONG, J. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 2, p. 33-40, 2018.
- ZHANG, Y.; ZHA, L.; LIU, W.; ZHOU, C.; SHAO, M.; YANG, Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen. **Plants**, v. 10, n. 1, e176, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10010176>

**Agradecimientos:** Agradecemos a la Universidad Nacional del Centro del Perú por el financiamiento para llevar a cabo este proyecto de investigación.

**Contribuciones de los autores:** Ambos autores participaron en todas las etapas de la ejecución del proyecto, así como en la redacción y edición del artículo. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión publicada del manuscrito.

**Financiación:** Universidad Nacional del Centro del Perú – Vicerrectorado de Investigación.

**Disponibilidad de los datos:** Los datos del estudio pueden obtenerse por correo electrónico del autor correspondiente. No están disponibles en el sitio web porque el proyecto de investigación aún está en desarrollo.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Derechos de autor: © 2026 de los autores. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial (CC BY-NC) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).