



Optimización de la densidad de siembra en sistemas NFT: Maximizando la eficiencia productiva de *Lactuca sativa* L. en valles interandinos

Optimizing planting density in NFT systems: Maximizing the productive efficiency of *Lactuca sativa* L. in inter-Andean valleys

Otimização da densidade de plantio em sistemas NFT: Maximizando a eficiência produtiva de *Lactuca sativa* L. em vales interandinos

ARTÍCULO ORIGINAL



Kreuger Wilermo Acuña Espinoza¹
kreuger2022@gmail.com

Zelmira Ilaria Encarnacion Baltazar³
zelmira.encarnacion@udh.edu.pe

Miltao Edelio Campos Albornoz²
mcamposa@undac.edu.pe

Vanesa Yessica Rojas Flores²
vrojasf@undac.edu.pe

Consuelo Noemi Toribio Ayala²
ctoribioa@undac.edu.pe

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.452>

¹Universidad Nacional Hermilio Valdizan. Huánuco, Perú

²Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión: Cerro de Pasco. Cerro de Pasco, Perú

³Universidad de Huánuco. Huánuco, Perú

Artículo recibido: 7 de noviembre 2025 / Arbitrado: 26 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

La optimización de la densidad de siembra es un factor determinante para maximizar la eficiencia en sistemas hidropónicos de técnica de película de nutrientes. **Objetivo:** determinar el efecto de diferentes densidades de siembra en el rendimiento y las características morfológicas de la lechuga hidropónica en el Valle de Huánuco, Perú. **Métodos:** Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. **Resultados:** mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) en todas las variables. El tratamiento T3 (250,000 plantas/ha) obtuvo el mayor rendimiento con 34,691.74 kg/ha y el mejor peso fresco por planta (208.15 g). En contraste, la densidad más alta (T4) provocó una reducción del rendimiento total debido a la competencia severa, induciendo además un alargamiento foliar excesivo (18.13 cm) como mecanismo de evasión de sombra. **Conclusiones:** una densidad de 250,000 plantas/ha optimiza la productividad espacial sin comprometer los estándares comerciales de la hortaliza.

Palabras clave: Densidad poblacional; Hidroponía; *Lactuca sativa*; Rendimiento agrícola; Técnica de Película de Nutrientes

ABSTRACT

Optimizing planting density is a key factor in maximizing efficiency in nutrient film hydroponic systems. **Objective:** To determine the effect of different planting densities on the yield and morphological characteristics of hydroponic lettuce in the Huánuco Valley, Peru. **Methods:** A completely randomized design with four replications was used. **Results:** Highly significant differences ($p < 0.01$) were found in all variables. Treatment T3 (250,000 plants/ha) yielded the highest production (34,691.74 kg/ha) and the best fresh weight per plant (208.15 g). In contrast, the highest density (T4) resulted in a reduction in total yield due to severe competition, also inducing excessive leaf elongation (18.13 cm) as a shade avoidance mechanism. **Conclusions:** A density of 250,000 plants/ha optimizes spatial productivity without compromising the vegetable's commercial standards.

Key words: Population density; Hydroponics; *Lactuca sativa*; Agricultural yield; Nutrient Film Technique

RESUMO

A otimização da densidade de plantio é um fator chave para maximizar a eficiência em sistemas hidropônicos de fluxo laminar de nutrientes. **Objetivo:** Determinar o efeito de diferentes densidades de plantio na produtividade e nas características morfológicas da alface hidropônica no Vale do Huánuco, Peru. **Métodos:** Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. **Resultados:** Foram encontradas diferenças altamente significativas ($p < 0,01$) em todas as variáveis. O tratamento T3 (250.000 plantas/ha) apresentou a maior produtividade (34.691,74 kg/ha) e o melhor peso fresco por planta (208,15 g). Em contrapartida, a maior densidade (T4) resultou em redução da produtividade total devido à competição intensa, induzindo também alongamento excessivo das folhas (18,13 cm) como mecanismo de escape do sombreamento. **Conclusões:** A densidade de 250.000 plantas/ha otimiza a produtividade espacial sem comprometer os padrões comerciais da hortaliza.

Palavras-chave: Densidade populacional; Hydroponics; *Lactuca sativa*; Produtividade agrícola; Técnica de Fluxo Laminar de Nutrientes

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria global enfrenta desafíos sin precedentes debido al crecimiento demográfico exponencial, la degradación de los suelos fértiles y la escasez hídrica exacerbada por el cambio climático (1). Ante este escenario, la Agricultura en Ambientes Controlados (CEA) ha emergido como una solución tecnológica fundamental para optimizar el uso de recursos naturales (2). Entre las técnicas más eficientes destaca la hidroponía, la cual permite cultivar plantas en soluciones minerales sin soporte edáfico, reduciendo el consumo de agua hasta en un 90% en comparación con la agricultura convencional (3).

El sistema de Técnica de Película de Nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos hidropónicos más adoptados a nivel comercial para la producción de hortalizas de hoja como la lechuga (*Lactuca sativa* L.) (4). La eficiencia del NFT radica en la recirculación continua de una lámina delgada de solución nutritiva que garantiza una oxigenación óptima y una disponibilidad constante de nutrientes en la rizósfera (5). Herrera et al. (6) y Pastor y Rodríguez, en estudios recientes señalan que esta técnica puede acelerar el crecimiento vegetativo entre un 10% y un 50% respecto a los sistemas tradicionales posicionando a la lechuga como el cultivo modelo debido a su

corto ciclo fenológico y alta demanda en mercados urbanos.

Sin embargo, la rentabilidad de los sistemas NFT depende críticamente de la optimización de los parámetros de manejo, entre los que destaca la densidad de siembra. La densidad poblacional determina el grado de competencia intraespecífica por luz, espacio y nutrientes (7). Según Febriana et al. (8), un incremento en la densidad de plantas por metro cuadrado puede maximizar el rendimiento total por unidad de área, pero conlleva una reducción en el peso fresco individual y en la calidad comercial de la planta. Esta respuesta plástica del cultivo se debe a la competencia lumínica; cuando la densidad es excesiva, las plantas activan mecanismos de evitación de la sombra, lo que resulta en un alargamiento del tallo y las hojas (etiología) y una disminución de la tasa fotosintética neta (9).

En regiones como Huánuco, Perú, la producción hidropónica representa una alternativa estratégica para la agricultura periurbana; no obstante, la falta de protocolos técnicos específicos sobre distanciamientos de siembra limita el potencial productivo de los agricultores locales. Investigaciones previas sugieren que no existe una densidad universal óptima, ya que la respuesta del cultivo varía según el genotipo, la intensidad lumínica del sitio y la

formulación de la solución nutritiva (10). Mientras que densidades bajas permiten el desarrollo de cabezas más vigorosas y pesadas, las densidades altas son preferidas en sistemas de "baby leaf" para maximizar la biomasa total (11, 12).

A pesar de los avances, persiste una brecha de información sobre el punto de equilibrio donde el aumento de la densidad poblacional deja de ser productivo para convertirse en un factor limitante en sistemas NFT bajo condiciones de valles interandinos (13). Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de diferentes densidades de siembra en el rendimiento y las características morfológicas de la lechuga hidropónica en el Valle de Huánuco, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

La investigación se llevó a cabo bajo condiciones controladas de invernadero. La zona presenta un clima templado seco, con una

altitud aproximada de 1,894 m.s.n.m. El sistema hidropónico se instaló en un entorno con control de ventilación lateral para regular las temperaturas internas.

Material biológico y sistema de cultivo

Se utilizó como material genético la lechuga (*Lactuca sativa* L.) de la variedad Crespa. El sistema de cultivo empleado fue el de NFT, consistente en canales de PVC con una pendiente del 2% para facilitar el flujo constante de la solución nutritiva mediante una bomba sumergible conectada a un tanque de almacenamiento.

Diseño experimental

Se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, totalizando 16 unidades experimentales. Los tratamientos (T) se definieron en función de la densidad de siembra (distancia entre plantas), proyectada a hectárea (ha), Figura 1.



Figura 1. Detalles de la instalación del sistema NFT y disposición de las unidades experimentales.

Manejo del Experimento

- T1: 166,667 plantas/ha (Distanciamiento de 0.25 m x 0.24 m).
- T2: 200,000 plantas/ha (Distanciamiento de 0.25 m x 0.20 m).
- T3: 250,000 plantas/ha (Distanciamiento de 0.25 m x 0.16 m).
- T4: 333,333 plantas/ha (Distanciamiento de 0.25 m x 0.12 m).

Cada unidad experimental consistió en un canal de cultivo con las perforaciones correspondientes a la densidad asignada.

- Siembra y Germinación: Las semillas se colocaron en cubos de espuma fenólica previamente hidratados. Tras 15 días, las

plántulas vigorosas fueron trasplantadas al sistema NFT.

- Solución Nutritiva: Se utilizó una formulación comercial balanceada para hortalizas de hoja. Se monitoreó diariamente el pH (mantenido entre 5.5 y 6.5) y la Conductividad Eléctrica (CE) (ajustada entre 1.5 y 2.0 dS/m).
- Control Fitosanitario: Se realizaron inspecciones visuales diarias para prevenir ataques de áfidos y enfermedades fúngicas, manteniendo condiciones de asepsia en el sistema.

Variables evaluadas

Al final del ciclo de cultivo (45 días después del trasplante), se evaluaron las siguientes variables:

- Morfológicas: Altura de planta (cm), número de hojas, longitud y ancho de hoja (cm), y diámetro de la planta.
- Productivas: Peso fresco total por planta (g) y rendimiento proyectado por hectárea (t/ha).

Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron sometidos a un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar efectos significativos. En los casos donde se detectaron diferencias, se aplicó la Prueba de Comparación de Medias de Duncan con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.01$. Los cálculos se realizaron utilizando el software estadístico InfoStat.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos tras la evaluación del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo diferentes densidades de siembra en un sistema hidropónico NFT muestran variaciones significativas en la mayoría de los parámetros evaluados. El análisis de varianza (ANOVA) confirmó la influencia de la densidad poblacional tanto en el desarrollo morfológico como en la capacidad productiva por unidad de superficie.

Desarrollo morfológico y vegetativo

El análisis de varianza para las variables morfológicas mostró diferencias significativas en todos los parámetros evaluados. En la Tabla 1 se resumen los promedios y la comparación de medias para el desarrollo vegetativo. El incremento de la densidad de siembra generó respuestas diferenciadas en las dimensiones de la planta. En cuanto a la altura de planta, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$), donde los tratamientos con densidades intermedias (T3: 250,000 plantas/ha y T2: 200,000 plantas/ha) mostraron un desarrollo superior, distinguiéndose estadísticamente de la densidad más alta (T4: 333,333 plantas/ha).

Para el diámetro de la planta, los datos revelaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). El tratamiento T3 (250,000 plantas/ha) y T2 alcanzaron los mayores promedios con 26.46 cm y 26.38 cm respectivamente, conformando el grupo estadístico superior según la prueba de Duncan. Este comportamiento sugiere que una densidad excesiva (T4) limita la expansión horizontal debido a la competencia intraespecífica por espacio y luz.

Tabla 1. Resumen de variables morfológicas de la lechuga hidropónica bajo diferentes densidades de siembra.

Tratamiento	Densidad (pltas /ha)	Altura de la planta (cm)	Diámetro de la planta (cm)	Nº de hojas / planta
T1	166,667	15.15 ab	25.51 a	22.96 a
T2	200,000	15.70 a	26.38 a	22.17 a
T3	250,000	16.85 a	26.46 a	23.17 a
T4	333,333	11.78 b	20.38 b	19.58 b
CV (%)		10.15	10.27	6.85

Nota: Promedios con letras iguales en la misma columna no presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Duncan ($p > 0.05$).

Los resultados obtenidos en cuanto a la altura y el diámetro de planta sugieren un umbral crítico de densidad. El hecho de que el tratamiento T3 (250,000 pltas/ha) presentara un desarrollo superior frente a la densidad más alta (T4). El descenso drástico del diámetro en el T4 (20.38 cm) es una respuesta típica de plasticidad fenotípica ante la restricción de espacio, donde la planta prioriza la supervivencia sobre la arquitectura óptima.

En cuanto al número de hojas, el máximo alcanzado por el T3 (23.17 hojas) refuerza la teoría de que una densidad moderada-alta en hidroponía optimiza la tasa de aparición foliar al no haber competencia crítica por nutrientes en la solución recirculante. Sin embargo, al llegar al T4, la

reducción en el conteo foliar sugiere que el factor limitante fue la interceptación lumínica.

Respecto a las dimensiones foliares

Se hallaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) relacionadas con la longitud de hoja. Curiosamente, la mayor densidad (T4) reportó la mayor longitud foliar promedio (18.13 cm), lo cual podría atribuirse a una respuesta etiolada por la alta competencia lumínica, alcanzó la mayor longitud promedio (18.13 cm), diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos T1, T2 y T3 no mostraron diferencias significativas entre sí, manteniéndose en un rango de 15.65 a 16.35 cm (Figura 2).

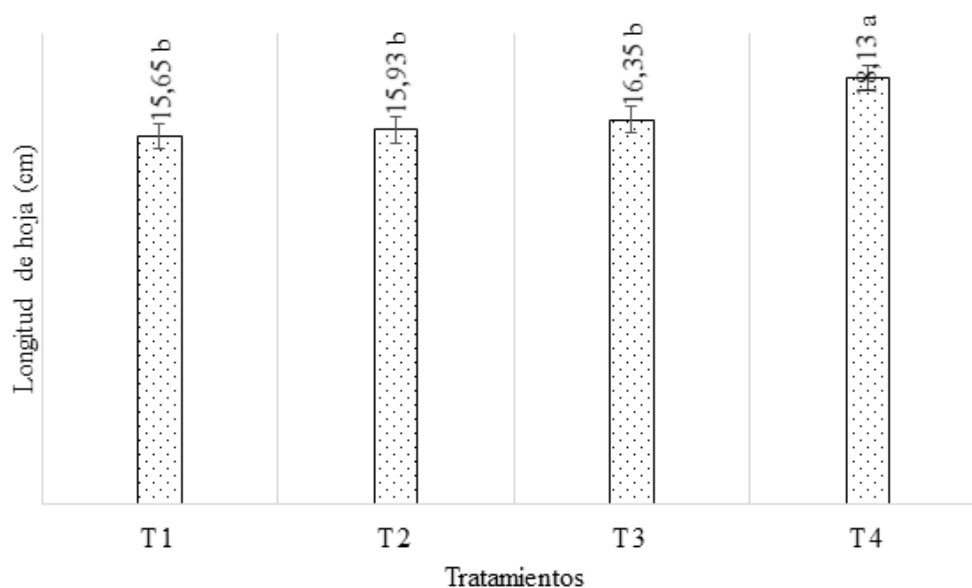


Figura 2. Efecto de la densidad de siembra sobre la longitud de hoja (cm) de *Lactuca sativa* L. en sistema hidropónico NFT.

En la Tabla 2 se muestra que, con relación al ancho de hoja, se determinan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.01$), donde los tratamientos T1, T2 y T3 mantuvieron una mayor amplitud foliar frente al T4, que se ubicó en un grupo inferior.

Tabla 2. Efecto de la densidad de siembra sobre la longitud y el ancho de hoja en *Lactuca sativa* L.

Tratamiento	Densidad (pltas/ha)	Ancho de hoja (cm)
T1	166,667	14.73 a
T2	200,000	14.80 a
T3	250,000	15.05 a
T4	333,333	13.30 b
Sig.		**
CV (%)		5.38

Nota: ** Indica diferencias altamente significativas ($p < 0.01$). Promedios con letras diferentes en la misma columna difieren significativamente según la prueba de Duncan.

Al analizar el número de hojas se comprueba que el tratamiento T3 (250,000 plantas/ha) destacó con el mayor promedio (23.17 hojas por planta), superando significativamente a las demás

densidades evaluadas. Por su parte, la longitud de hoja mostró su valor máximo en la densidad más alta (T4: 18.13 cm), mientras que el ancho de hoja disminuyó significativamente. Este fenómeno se

explica mediante el “Síndrome de Evitación de la Sombra” (SAS, por sus siglas en inglés).

Parámetros de biomasa y rendimiento

En la Tabla 3 se muestra el peso fresco por planta, como uno de los indicadores más afectados por la densidad de siembra, mostrando diferencias altamente significativas ($p < 0.01$). El tratamiento T3 alcanzó el valor máximo con 208.15 g/planta, seguido de forma descendente por T1 (190.85 g) y T2 (173.22 g). El peso más bajo se registró en la densidad de 333,333 plantas/ha (T4), evidenciando que la saturación poblacional reduce drásticamente el vigor individual.

Finalmente, el rendimiento total por hectárea mostró variaciones críticas ($p < 0.01$). La densidad de 250,000 plantas/ha (T3) resultó ser la más eficiente, logrando un rendimiento de 34,691.74 kg/ha, situándose en el primer orden de mérito estadístico. Aunque se esperaba que la densidad más alta (T4) produjera más biomasa total, la competencia severa resultó en plantas de menor calidad comercial y menor peso acumulado por área en comparación con el punto óptimo hallado en T3. La biomasa individual y el rendimiento proyectado por hectárea fueron influenciados de manera altamente significativa por la densidad poblacional, Tabla 3.

Tabla 3. Efecto de la densidad de siembra sobre el peso fresco individual y el rendimiento total.

Tratamiento	Densidad (pltas/ha)	Peso Fresco (g/planta)	Rendimiento (kg/ha)
T1	166,667	190.85 ab	31,807.56 ab
T2	200,000	172.32 b	28,719.64 b
T3	250,000	208.15 a	34,691.74 a
T4	333,333	160.45 b	26,742.97 c
CV (%)		6.67	7.12

Nota: Letras distintas indican diferencias altamente significativas ($p < 0.01$).

El peso fresco por planta fue mayor en el T3 (208.15 g), superando incluso a las densidades más bajas (T1 y T2). Sin embargo, el hallazgo más relevante es el rendimiento total por hectárea. El T3 alcanzó la máxima productividad (34,691.74 kg/ha), mientras que el T4, a pesar de tener más plantas, sufrió una caída en el rendimiento total (26,742.97 kg/ha). Este comportamiento describe

una curva parabólica de rendimiento que es característica de los agroecosistemas eficientes. Esto demuestra que, para la lechuga cressa en el Valle de Huánuco, la densidad de 250,000 pltas/ha maximiza la rentabilidad del sistema NFT, evitando las pérdidas por competencia severa observadas en densidades superiores.

Discusión

Los resultados obtenidos en la evaluación de diferentes densidades de siembra para *Lactuca sativa* L. en sistema hidropónico NFT evidencian respuestas fisiológicas y productivas diferenciales que requieren un análisis comparativo con la literatura especializada. A continuación, se discuten estos hallazgos a la luz de investigaciones previas, identificando convergencias y discrepancias que permitan contextualizar el comportamiento del cultivo en las condiciones específicas de los valles interandinos.

Los hallazgos del presente estudio demuestran que la densidad de siembra ejerce una influencia determinante sobre el desarrollo morfológico y productivo de *Lactuca sativa* L. en sistemas NFT, estableciendo un umbral óptimo en 250,000 plantas ha^{-1} que maximiza el rendimiento sin comprometer la calidad comercial, coincidiendo con los resultados obtenidos por Atmarihan et al. (14).

La respuesta diferencial observada en las variables morfológicas coincide parcialmente con lo reportado por Samy y Roy (15), quienes documentaron que densidades superiores a 280,000 plantas ha^{-1} en sistemas hidropónicos generan una interferencia física que limita la expansión foliar horizontal. Sin embargo, a diferencia de estos autores, quienes encontraron una reducción lineal del diámetro con el

incremento poblacional, el presente estudio evidenció que densidades intermedias (200,000-250,000 plantas ha^{-1}) permiten mantener diámetros comerciales superiores a 26 cm, sugiriendo que en condiciones de valle interandino el sombreado mutuo es menos severo debido a la mayor radiación incidente.

En cuanto al número de hojas, los resultados obtenidos (23.17 hojas en el tratamiento óptimo) superan los valores reportados por Chowdhury et al. (16) en sistemas convencionales (18-20 hojas), lo que podría atribuirse a la disponibilidad continua de nutrientes en la solución recirculante del NFT. No obstante, la drástica reducción foliar observada en la máxima densidad (333,333 plantas ha^{-1}) coincide con lo descrito por Tonello et al. (17), quienes atribuyen este fenómeno al autosombreado que induce senescencia prematura de hojas basales.

Un hallazgo particularmente relevante fue la elongación foliar registrada en la densidad más alta (18.13 cm), acompañada de una reducción significativa del ancho. Este patrón morfológico corresponde al "Síndrome de Evitación de la Sombra" documentado por Wilson et al. (18), donde las plantas bajo competencia lumínica priorizan la elongación celular sobre la expansión laminar. Boccalandro et al. (19), demostraron que esta respuesta, mediada por fitocromos, resulta en hojas más largas pero fisiológicamente

ineficientes, lo que explica el bajo peso fresco obtenido en el T4 a pesar de su mayor longitud foliar.

Respecto al rendimiento total, la relación no lineal encontrada contradice parcialmente el principio ecológico tradicional que postula una correlación negativa entre densidad y biomasa individual. Este comportamiento coincide con lo descrito por Pretzsch et al. (20), quienes demostraron que en sistemas hidropónicos cerrados, el estrés por hacinamiento reduce la eficiencia fotosintética global cuando se supera la capacidad de carga del sistema.

Los rendimientos obtenidos (34.69 t ha⁻¹ en T3) superan ampliamente los promedios reportados por Kawser et al. (21) en sistemas NFT a densidades similares (28-30 t ha⁻¹), lo que sugiere que las condiciones ambientales de los valles interandinos, alta radiación y amplitud térmica, potencian la productividad del sistema cuando la densidad es adecuada.

El análisis comparativo con la literatura especializada revela que los hallazgos presentan tanto convergencias como divergencias respecto a investigaciones previas. Coinciden con estudios que documentan la limitación del desarrollo morfológico por competencia intraespecífica en altas densidades y confirman la presencia de respuestas fisiológicas como la elongación foliar ante estrés lumínico. Sin embargo, discrepan de

investigaciones tradicionales que postulan una relación inversa lineal entre densidad y biomasa individual, evidenciando en su lugar una relación parabólica con un punto óptimo productivo. Asimismo, los rendimientos obtenidos superan los promedios reportados en condiciones similares, sugiriendo que las características ambientales de los valles interandinos potencian la eficiencia del sistema NFT cuando la densidad es adecuada.

CONCLUSIONES

La densidad de siembra ejerce una influencia crítica y estadísticamente significativa sobre el desarrollo morfológico y el rendimiento de *Lactuca sativa* L. en sistemas hidropónicos NFT bajo las condiciones del Valle de Huánuco.

El tratamiento T3 (250,000 plantas ha⁻¹) constituye el punto de equilibrio técnico-productivo óptimo, logrando el mayor rendimiento por unidad de superficie (34,691.74 kg ha⁻¹) y un peso fresco individual comercialmente superior (208.15 g), superando a densidades menores y mayores. Este comportamiento confirma que en sistemas NFT existe una densidad óptima que maximiza la eficiencia del uso del espacio sin comprometer la biomasa individual.

Se identificó una respuesta de plasticidad fenotípica ante la competencia lumínica en la densidad más alta (T4: 333,333 plantas ha⁻¹), caracterizada por un alargamiento significativo

de las hojas (18.13 cm) y una reducción en el diámetro de planta y ancho foliar, lo que compromete la calidad estética y comercial del cultivo. Esta morfo-anomalía, consistente con el síndrome de evitación de sombra, demuestra que las plantas priorizan la elongación celular sobre la expansión laminar bajo condiciones de estrés por hacinamiento.

El incremento de la densidad poblacional más allá de las 250,000 plantas ha⁻¹ resulta contraproducente, ya que la competencia intraespecífica severa reduce el rendimiento total en un 22.9% respecto al punto óptimo, invalidando la estrategia de mayor densidad para mayor productividad en este sistema. Este hallazgo evidencia que en hidroponía NFT la relación densidad-rendimiento no es lineal sino parabólica, existiendo un umbral a partir del cual el incremento poblacional penaliza la productividad global.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación con este estudio. El presente trabajo fue financiado con recursos propios de la institución académica.

REFERENCIAS

1. Boretti A, Rosa L. Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*. 2019;2(1):15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
2. Nwanjoku M, Anumudu C, Onyeaka H. Impact of controlled environment agriculture (CEA) in Nigeria, a review of the future of farming in Africa. *Agriculture*. 2025;15(2):117. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020117>
3. Fathidarehnejeh E, Nadeem M, Cheema M, Thomas R, Krishnapillai M, Galagedara L. Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*. 2023;104(2):88-102. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034>
4. Palmitessa O, Signore A, Santamaria P. Advancements and future perspectives in nutrient film technique hydroponic system: a comprehensive review and bibliometric analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1504792. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504792>
5. Nitu O, Ivan E, Tronac A, Arshad A. Optimizing lettuce growth in nutrient film technique hydroponics: Evaluating the impact of elevated oxygen concentrations in the root zone under LED illumination. *Agronomy*. 2024;14(9):1896. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091896>
6. Herrera R, Martínez J, Botello E, Sámano V, Martínez C, Moreno C. Smart hydroponic cultivation system for lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth under different nutrient solution concentrations in a controlled environment. *Applied System Innovation*. 2025;8(4):110. <https://doi.org/10.3390/asi8040110>
7. Veronica B, Arshad A, Elena D, Ovidiu J, Maria D. Influence of Growing Technology on Quality Indicators of Lettuce Cultivated in a Nutrient Film Technique System. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*. 5(4):1371-6. <https://doi.org/10.62225/2583049X.2025.5.4.4766>
8. Febriana I, Wijana G, Sukewijaya I, Darmawati I, Pradnyawathi N. Optimizing Seedling Density per Planting Hole of Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) in a Deep Flow Technique Hydroponic System. *Agro Bali: Agricultural Journal*. 2025;8(3):1106-13. <https://doi.org/10.37637/ab.v8i3.2441>
9. Martinez F, Rodriguez M. Molecular mechanisms of shade tolerance in plants. *New Phytologist*. 2023;239(4):1190-202. <https://doi.org/10.1111/nph.19047>

10. Rodríguez A. Peruvian hydroponics: Low-cost options to produce vegetables for south American cities. *Urban and Regional Agriculture*: Elsevier; 2023. 561-94.
11. Jadhav V, Grondona T, Pistillo A, Pennisi G, Ghio M, Gianquinto G, et al. Optimizing Planting Density for Increased Resource Use Efficiency in Baby-Leaf Production of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Basil (*Ocimum basilicum* L.) in Vertical Farms. *Horticulturae*. 2025;11(4):343. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11040343>
12. Sheibani F, Gómez C, Morrow R, Bourget M, Mitchell CA. Interactive Effects of Photon Flux Density and Carbon Dioxide Concentration on Energy-use Efficiency for Indoor Baby-greens Production. *HortScience*. 2025;60(7):1092-8. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI18565-25>
13. Escalante J, Sacoto E, Coaquira R, Utrilla L, Herrera J, Concha Y, et al. Design and validation of an IoT-integrated fuzzy logic controller for high-altitude NFT hydroponic systems: a case study in Cusco, Peru. *Electronics*. 2025;14(18):3740. <https://doi.org/10.3390/electronics14183740>
14. Atmarihan R, Rai IN, Mayadewi N. Stability test and identification of factors causing inconsistencies in the quantity and quality of lettuce yield (*Lactuca sativa* L.) at different planting times in NFT system hydroponics. *Open Access Research Journal of Biology Pharmacy*. 2025;13(1):030-6. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2836370/v1>
15. Samy A, Roy E. Assessing the effect of planting density on romaine lettuce growth and quality in a controlled hydroponic environment. *World Water Policy*. 2023. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12259>
16. Chowdhury M, Samarakoon U, Altland J. Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1401089. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089>
17. Tonello G, Schneider J, Chiomento J, Chavarria G. Unlocking the potential of artificial nighttime lighting in agricultural fields: a novel approach to enhancing crop productivity. *The Journal of Agricultural Science*. 2025;163(5):481-92. <https://doi.org/10.1017/S002185962510018X>
18. Wilson D, Bhatia N, Runions A, Tsiantis M. From genes to shape in leaf development and evolution. *Current Biology*. 2022;32(21):R1215-R22. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.09.021>
19. Boccalandro H, Rugnone M, Moreno J, Ploschuk E, Serna L, Yanovsky M, et al. Phytochrome B enhances photosynthesis at the expense of water-use efficiency in *Arabidopsis*. *Plant physiology*. 2009;150(2):1083-92. <https://doi.org/10.1104/pp.109.135509>
20. Pretzsch H, del Río M, Toraño-Caicoya A, Montero G. Estimación de la productividad de las masas forestales. *Crecimiento y Producción Forestales: Fundamentos y Aplicaciones a la Gestión*: Springer; 2025. p. 477-517. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69516-6_8
21. Kawser A, Hossain M, Yeasmin M. Optimizing the planting density of lettuce (*Lactuca sativa*) with tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a recirculation aquaponic system. *American Journal of Agricultural Science, Engineering Technology*. 2017;4(1):1-12. <https://doi.org/10.54536/ajaset.v4i1.41>