

Desempeño agronómico y respuesta fisiológica de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en sistemas hidropónico y acuapónico bajo ambiente controlado

Agronomic performance and physiological response of basil (*Ocimum basilicum* L.) in hydroponic and aquaponic systems under controlled environment

Alan Gerardo Rangel Preciado^{1*}, Fortunato Ruiz Martínez¹, Francisco Peñuelas Montoya¹, Everardo López Bautista¹, Jaime Antonio Miranda Valdez¹

¹Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, México

<https://orcid.org/0009-0003-7205-805X>

<https://orcid.org/0000-0002-9528-4063>

<https://orcid.org/0009-0004-1258-3618>

<https://orcid.org/0000-0003-0111-3683>

<https://orcid.org/0009-0006-6445-0352>

*Autor para correspondencia, email: 16030133.rangel@ms.uas.edu.mx

Resumen

La producción sostenible de cultivos aromáticos en sistemas sin suelo constituye una estrategia relevante para optimizar el uso de agua y nutrientes bajo condiciones controladas. El presente estudio evaluó el desempeño agronómico y la respuesta fisiológica de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) cultivada en sistemas hidropónico y acuapónico. Se estableció un diseño completamente al azar con dos tratamientos y 19 plantas por sistema. Se evaluaron variables de crecimiento, biomasa fresca y seca, área foliar, número de hojas y concentración de clorofila, además del monitoreo continuo de conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa. Ambos sistemas mantuvieron estabilidad fisicoquímica durante el periodo experimental, con conductividades promedio de 1.55 y 1.37 mS cm⁻¹ en hidroponía y acuaponía, respectivamente. No se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en altura final (14.64 vs 16.43 cm), longitud radical (13.04 vs 13.09 cm), número de hojas (36.63 vs 33.93), biomasa fresca aérea (23.04 vs 13.15 g) ni biomasa seca aérea (1.01 vs 0.58 g). Sin embargo, la concentración de clorofila fue significativamente mayor en hidroponía (28.25 unidades SPAD) que en acuaponía (15.74 unidades SPAD) ($p < 0.05$). Los resultados indican que, aunque la hidroponía favorece un mayor estado nitrogenado foliar, la acuaponía puede sostener crecimiento estructural y producción de biomasa comparables bajo ambiente controlado. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica de la acuaponía como alternativa productiva sostenible sin comprometer significativamente el rendimiento vegetal.

Palabras clave: agricultura sostenible, biomasa vegetal, estado nitrogenado, producción sin suelo, sistemas integrados

Abstract

Sustainable production of aromatic crops in soilless systems represents a relevant strategy to optimize water and nutrient use under controlled conditions. This study evaluated the agronomic performance and physiological response of basil (*Ocimum basilicum* L.) grown in hydroponic and aquaponic systems. A completely randomized design with two treatments and 19 plants per system was implemented. Growth parameters, fresh and dry biomass, leaf area, leaf number, and chlorophyll concentration were assessed, while electrical conductivity, temperature, and relative humidity were continuously monitored. Both systems maintained physicochemical stability throughout the experimental period, with average electrical conductivity values of 1.55 and 1.37 mS cm⁻¹ in hydroponics and aquaponics, respectively. No significant differences ($p > 0.05$) were observed in final plant height (14.64 vs 16.43 cm), root length (13.04 vs 13.09 cm), leaf number (36.63 vs 33.93), fresh shoot biomass (23.04 vs 13.15 g), or dry shoot biomass (1.01 vs 0.58 g). However, chlorophyll concentration was significantly higher in hydroponics (28.25 SPAD units) than in aquaponics (15.74 SPAD units) ($p < 0.05$). Although hydroponics enhanced foliar nitrogen status, aquaponics sustained comparable structural growth and biomass production under controlled conditions, supporting its technical feasibility as a sustainable production alternative.

Keywords: sustainable agriculture, plant biomass, nitrogen status, soilless production, integrated systems

Introducción

La producción agrícola enfrenta desafíos crecientes asociados al incremento poblacional, la presión sobre los recursos hídricos y la degradación del suelo, lo que impulsa la necesidad de desarrollar sistemas de cultivo más eficientes y sostenibles (Cotler *et al.*, 2020). En este contexto, los sistemas sin suelo, particularmente la hidroponía y la acuaponía, han emergido como alternativas tecnológicas capaces de incrementar la productividad mediante un manejo preciso de la nutrición vegetal y una mayor eficiencia en el uso del agua (Rajaseger *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Estas estrategias se alinean con iniciativas internacionales orientadas a fortalecer la seguridad alimentaria y promover la transformación azul en la producción acuícola (FAO, 2022).

La hidroponía se caracteriza por el suministro directo de soluciones nutritivas balanceadas a la zona radical, permitiendo un control riguroso de la concentración iónica y de las variables ambientales, lo que la posiciona como un sistema altamente tecnificado para la producción hortícola intensiva (Castañares, 2020; Rajaseger *et al.*, 2023). En contraste, la acuaponía integra la producción vegetal con la acuicultura en un sistema recirculante donde los residuos metabólicos de los peces son transformados microbiológicamente en nutrientes asimilables para las plantas, favoreciendo el reciclaje de recursos y la sostenibilidad del sistema productivo (Wang *et al.*, 2024). Este enfoque ha sido descrito como viable tanto para producción a pequeña y mediana escala (Somerville, 2020) como para esquemas acuícolas modernos orientados a eficiencia ambiental (Cuaspa-Benavides *et al.*, 2019).

La albahaca (*Ocimum basilicum* L.) es una especie aromática de alto valor comercial ampliamente utilizada en la industria alimentaria y farmacéutica. Su rápido crecimiento y adaptabilidad la convierten en un modelo adecuado para evaluar sistemas sin suelo. Estudios recientes han demostrado su desempeño favorable tanto en hidroponía como en acuaponía; sin embargo, la disponibilidad y estabilidad nutrimental pueden influir en parámetros fisiológicos específicos, particularmente aquellos relacionados con el estado nitrogenado y la eficiencia fotosintética (Knaus *et al.*, 2024; Patloková & Pokluda, 2024). Asimismo, el manejo de la solución

nutritiva incide directamente en el rendimiento y la calidad del cultivo (Hazrati *et al.*, 2024).

Adicionalmente, la incorporación de tecnologías de monitoreo basadas en sensores e Internet de las Cosas ha permitido optimizar el control de variables como temperatura, humedad relativa y conductividad eléctrica en sistemas sin suelo, favoreciendo una gestión más precisa del entorno de cultivo (Sadek *et al.*, 2024). No obstante, aún es necesario profundizar en la comparación integral entre hidroponía y acuaponía bajo condiciones ambientales controladas, particularmente en lo referente a la relación entre desempeño estructural y respuesta fisiológica del cultivo.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño agronómico y la respuesta fisiológica de albahaca cultivada en sistemas hidropónico y acuapónico bajo ambiente controlado, analizando variables de crecimiento, biomasa y concentración de clorofila, así como el comportamiento de parámetros ambientales durante el ciclo productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se realizó en el Laboratorio de Acuicultura del Instituto Tecnológico de Sonora, Unidad Centro, en Ciudad Obregón, Sonora. El cultivo se desarrolló bajo condiciones controladas en interior con iluminación artificial (fotoperiodo de 12 h).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con dos tratamientos definidos por el tipo de sistema de cultivo: (1) sistema hidropónico NFT con solución nutritiva Hoagland y (2) sistema acuapónico NFT alimentado con efluente proveniente de un sistema de recirculación acuícola (RAS) de tilapia.

Ambos tratamientos se instalaron sobre una estructura metálica de $4 \times 1 \times 1$ m que soportó seis canales de PVC (4 m de longitud; 19 sitios de plantación por canal). Los canales se distribuyeron equitativamente entre tratamientos (tres por sistema), manteniendo la misma densidad y arreglo espacial (Figura 1). Cada canal operó de manera independiente en cuanto a circulación hidráulica dentro de su respectivo sistema.

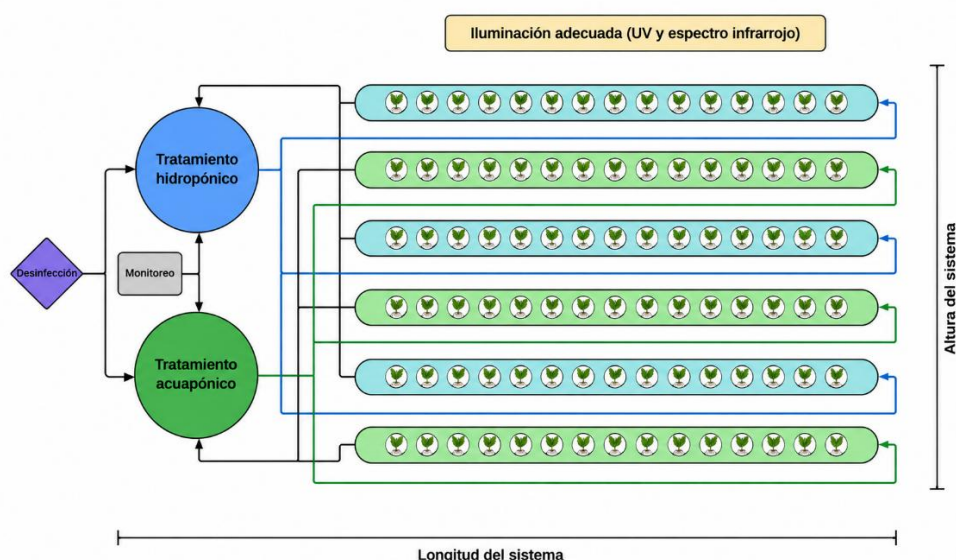


Figura 1. Diagrama funcional del sistema NFT con tratamientos hidropónico y acuapónico bajo ambiente protegido.

La circulación de la solución se mantuvo mediante bombas de flujo continuo con capacidad nominal de 33 L min⁻¹, asegurando una película uniforme sobre la zona radical. La oxigenación se garantizó mediante aros difusores conectados a un sistema de aireación continua. La iluminación se proporcionó mediante once lámparas LED distribuidas homogéneamente sobre la estructura experimental. La intensidad lumínica fue verificada periódicamente mediante luxómetro digital para asegurar uniformidad espacial entre tratamientos.

Se establecieron 38 plantas en total (19 por tratamiento), las cuales fueron consideradas unidades experimentales para la evaluación de las variables agronómicas. No obstante, ambos tratamientos operaron dentro de sistemas de recirculación independientes únicos, condición que debe considerarse al interpretar los resultados en términos de replicación estructural.

Descripción de los sistemas de cultivo

Tratamiento hidropónico. El sistema hidropónico operó bajo la técnica de película nutritiva (NFT) utilizando solución nutritiva Hoagland preparada con agua potable previamente acondicionada. La solución se formuló de acuerdo con la concentración estándar para cultivos hortícolas de hoja y se ajustó progresivamente mediante incrementos semanales del 25 % en la concentración iónica total, en función del desarrollo fenológico del cultivo y la demanda nutrimental estimada.

La conductividad eléctrica y el pH fueron monitoreados periódicamente para mantenerlos dentro de rangos adecuados para albahaca (1.0-2.0 mS cm⁻¹ y pH 5.5-6.5, respectivamente). La solución nutritiva se renovó completamente cada siete días con el fin de evitar

desequilibrios iónicos, acumulación de sales y variaciones en la relación nitrato: amonio.

El sistema operó en recirculación cerrada, asegurando suministro continuo de nutrientes y homogeneidad en la composición de la solución durante cada ciclo semanal.

Tratamiento acuapónico. El sistema acuapónico consistió en la integración del módulo NFT con un sistema de recirculación acuícola (RAS) destinado al cultivo de tilapia (*Oreochromis* spp.). El agua utilizada en los canales NFT correspondió al efluente del RAS, el cual contenía compuestos nitrogenados derivados del metabolismo de los peces, principalmente amonio (NH₄⁺), que posteriormente es transformado en nitrito (NO₂⁻) y nitrato (NO₃⁻) mediante procesos de nitrificación biológica.

El sistema operó en recirculación continua, permitiendo el aprovechamiento de nutrientes disueltos como fuente principal de fertilización para el cultivo vegetal. A diferencia del sistema hidropónico, la composición nutrimental del agua dependió de la dinámica metabólica de los peces, la tasa de alimentación y la eficiencia del proceso de nitrificación.

Con el propósito de mantener condiciones experimentales comparables entre tratamientos y evitar acumulación excesiva de metabolitos, el agua del sistema acuapónico fue renovada completamente cada siete días. Esta estrategia permitió estandarizar los ciclos de recambio en ambos tratamientos, aunque se reconoce que puede modificar parcialmente la dinámica natural del sistema acuapónico.

Material vegetal y manejo del cultivo

Se utilizaron plántulas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) producidas en charolas de germinación de poliestireno expandido bajo condiciones controladas. El sustrato empleado consistió en una mezcla de turba, tierra negra y humus de lombriz en proporción 10:5:1 (v/v), previamente homogeneizada para asegurar uniformidad física y nutricional durante la etapa de establecimiento.

La germinación se realizó en ambiente protegido, manteniendo humedad constante hasta la emergencia completa. El trasplante se efectuó a los 21 días después de la siembra (DDS), seleccionando plántulas fisiológicamente uniformes con una altura promedio de 5 ± 0.5 cm y una longitud radical de 3-5 cm, descartando individuos con variaciones morfológicas evidentes o desarrollo asimétrico.

Previo al trasplante, las raíces fueron cuidadosamente lavadas para remover restos de sustrato y evitar interferencias en el flujo de la solución nutritiva dentro del sistema NFT. Las plántulas se colocaron en los sitios de plantación utilizando soportes inertes que permitieron la libre exposición del sistema radical a la lámina nutritiva.

Se establecieron 38 plantas en total, distribuidas equitativamente entre tratamientos ($n = 19$ por sistema). La densidad de plantación fue equivalente en ambos sistemas, manteniendo la misma disposición espacial y condiciones ambientales para minimizar efectos de posición dentro de la estructura experimental.

Durante el ciclo de cultivo no se realizaron podas ni aplicaciones externas de fertilizantes o reguladores de crecimiento, con el fin de evaluar exclusivamente el efecto del tipo de sistema sobre el desempeño agronómico de la especie.

Variables evaluadas

Durante el periodo experimental se evaluaron variables morfológicas, biométricas y fisiológicas en plantas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) con el propósito de comparar su desempeño bajo ambos sistemas de cultivo.

Crecimiento vegetativo. La altura de planta (cm) se registró semanalmente desde la base del tallo hasta el ápice vegetativo utilizando una regla milimetrada. Las mediciones se realizaron siempre en el mismo horario para reducir variabilidad asociada a cambios en turgencia.

La concentración relativa de clorofila se determinó semanalmente mediante un medidor portátil SPAD-502 Plus (Konica Minolta, Japón). Las lecturas se realizaron en hojas completamente expandidas ubicadas en el tercio medio de la planta, evitando nervaduras principales. En cada planta se efectuaron tres lecturas por hoja y se calculó el promedio para su análisis estadístico.

Variables radicales. La longitud de raíz (cm) se determinó al momento de la cosecha, midiendo la raíz principal desde la base del tallo hasta el extremo distal utilizando una regla

milimetrada, tras lavado cuidadoso del sistema radical para eliminar residuos.

Biomasa. Al finalizar el ciclo de cultivo, las plantas fueron cosechadas y separadas en parte aérea y raíz. El peso fresco (g) se determinó inmediatamente después de la cosecha utilizando una balanza digital con precisión de 0.01 g.

Posteriormente, el material vegetal se sometió a secado en estufa de convección forzada a 75 °C durante 48 h hasta peso constante. El peso seco (g) se registró mediante balanza analítica con precisión de 0.001 g.

Componentes foliares. El número de hojas se determinó mediante conteo directo al momento de la cosecha, considerando únicamente hojas completamente desarrolladas.

El área foliar (cm²) se estimó mediante análisis digital de imágenes. Las hojas se dispusieron individualmente sobre fondo blanco con referencia métrica y fueron fotografiadas con cámara digital a distancia fija. Las imágenes se procesaron con el software ImageJ (National Institutes of Health, USA), calibrando previamente la escala mediante la referencia incluida en cada imagen.

Sistema de monitoreo ambiental

El monitoreo de variables fisicoquímicas se realizó mediante un sistema de adquisición de datos basado en una plataforma Arduino Uno (Arduino LLC, Italia), configurada para el registro continuo de conductividad eléctrica (CE), temperatura y humedad relativa.

La conductividad eléctrica (mS cm⁻¹) se midió mediante un sensor TDS sumergible previamente calibrado, mientras que la temperatura (°C) se registró mediante un termistor NTC 10k acoplado al sistema hidráulico. La humedad relativa (%) se determinó utilizando un sensor digital DHT11 instalado a la altura del dosel vegetal.

Los datos fueron registrados automáticamente a intervalos programados (especificar frecuencia, por ejemplo: cada 10 min) y almacenados en un módulo microSD, incorporando sello temporal mediante un reloj en tiempo real (RTC). Esta configuración permitió generar un registro continuo del comportamiento ambiental durante todo el periodo experimental.

La precisión del sistema fue verificada periódicamente mediante comparación con instrumentos portátiles calibrados (conductímetro y termohigrómetro digital). Las diferencias observadas se mantuvieron dentro del margen de error especificado por los fabricantes de los sensores, por lo que los datos se consideraron confiables para el seguimiento ambiental del experimento.

El sistema de monitoreo se empleó exclusivamente como herramienta de control y registro ambiental, sin intervención automatizada en la regulación de las condiciones de cultivo.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron bajo un diseño completamente al azar considerando como factor principal el tipo de sistema de cultivo (hidropónico vs. acuapónico). Cada planta fue considerada unidad experimental para las variables de crecimiento y fisiología.

Las variables se expresaron como media $\pm$ desviación estándar y se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para detectar diferencias entre tratamientos, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (95 % de confianza). Cuando se identificaron diferencias estadísticas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El análisis estadístico se efectuó con el software Statgraphics Plus versión 5.1 (Statistical Graphics Corp., USA).

Resultados y discusión

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) se mantuvo dentro de un rango de 0.65 a 1.80 mS cm^{-1} durante el periodo experimental, con valores promedio de 1.55 mS cm^{-1} en el sistema hidropónico y 1.37 mS cm^{-1} en el sistema acuapónico (Figura 2). Ambos tratamientos se mantuvieron dentro del intervalo óptimo reportado para albahaca en sistemas sin suelo (1.0-2.0 mS cm^{-1}), lo que sugiere condiciones nutrimentales adecuadas para el desarrollo vegetativo de *Ocimum basilicum* L.

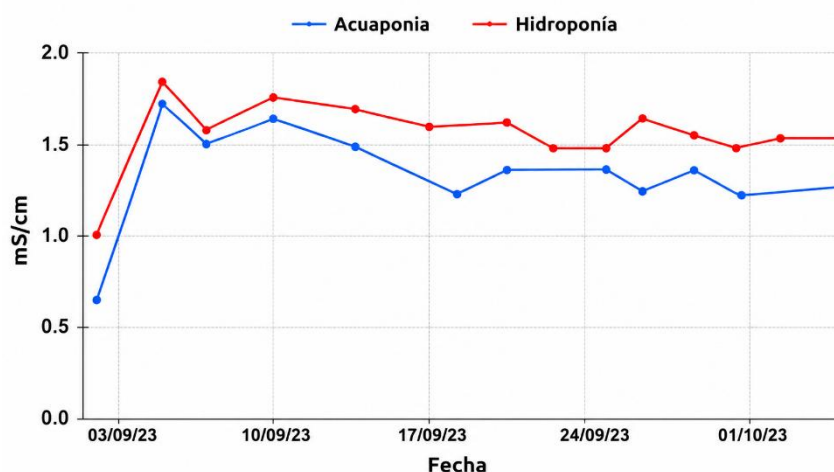


Figura 2. Dinámica temporal de la conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) en sistemas NFT hidropónico y acuapónico durante el cultivo de *Ocimum basilicum* L.

La ligera diferencia observada entre sistemas refleja la naturaleza de cada esquema productivo. En el sistema hidropónico, la CE mostró mayor estabilidad y valores promedio superiores, atribuibles a la formulación controlada y al ajuste progresivo de la solución nutritiva. Esta condición favorece un suministro iónico predecible y homogéneo en la rizosfera, lo cual es crítico para mantener el potencial osmótico adecuado y optimizar la absorción nutrimental.

En contraste, el sistema acuapónico presentó una CE promedio ligeramente menor y con variaciones temporales más marcadas, comportamiento asociado a la dinámica metabólica del sistema acuícola. En estos sistemas, la disponibilidad nutrimental depende de la excreción nitrogenada de los peces y de la eficiencia del proceso de nitrificación biológica, lo que puede generar fluctuaciones en la concentración iónica total. Sin embargo, las

variaciones registradas no superaron límites considerados restrictivos para la especie.

Desde una perspectiva fisiológica, mantener la CE dentro de rangos óptimos evita tanto estrés osmótico por salinidad excesiva como deficiencias asociadas a soluciones diluidas. En cultivos de hoja como la albahaca, desviaciones significativas en CE pueden afectar expansión foliar, acumulación de biomasa y concentración de compuestos secundarios. En este estudio, la estabilidad general observada en ambos sistemas sugiere que ninguno generó condiciones de estrés salino.

Estos resultados coinciden con reportes recientes que destacan la importancia de la estabilidad iónica en sistemas hidropónicos modernos, donde el control preciso de CE se asocia con mayor eficiencia en absorción nutrimental y rendimiento vegetal (Rajaseger *et al.*, 2023). De manera similar, estudios en acuaponía han señalado que, aunque

pueden presentarse fluctuaciones leves en CE debido a procesos biológicos internos, sistemas adecuadamente balanceados mantienen niveles compatibles con el crecimiento óptimo de cultivos hortícolas (Wang *et al.*, 2024).

En términos agronómicos, la proximidad de los valores promedio entre tratamientos indica que ambos sistemas ofrecieron condiciones nutricionales comparables durante el ciclo experimental. Por lo tanto, cualquier diferencia observada en variables de crecimiento o biomasa no puede atribuirse exclusivamente a desbalances severos en conductividad eléctrica, sino probablemente a diferencias

cualitativas en la composición iónica y en la dinámica de disponibilidad nutrimental.

Temperatura

La temperatura ambiental osciló entre 24 y 33 °C durante el periodo experimental, con promedios de 26.05 °C en el sistema hidropónico y 27.50 °C en el sistema acuapónico (Figura 3). Las variaciones registradas fueron similares entre tratamientos y no evidenciaron diferencias térmicas consistentes atribuibles al tipo de sistema de cultivo.

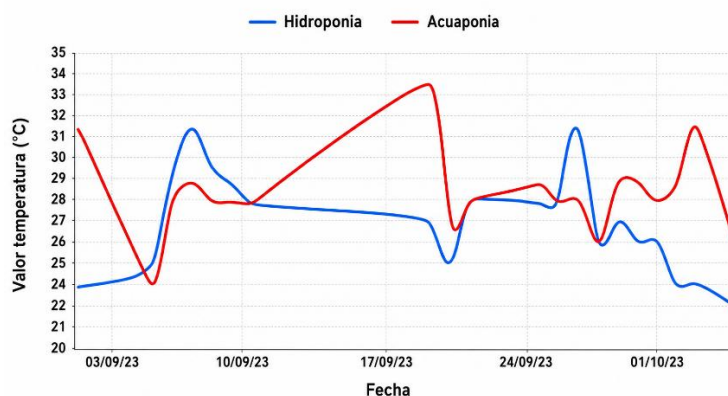


Figura 3. Dinámica temporal de la temperatura ambiental (°C) en sistemas NFT hidropónico y acuapónico durante el cultivo de *Ocimum basilicum* L.

Los valores observados se mantuvieron dentro del rango óptimo reportado para el crecimiento vegetativo de *Ocimum basilicum* L. (22-30 °C), lo que sugiere condiciones favorables para la actividad fotosintética y la expansión foliar. Temperaturas dentro de este intervalo promueven una adecuada tasa metabólica, favorecen la asimilación de carbono y optimizan la absorción nutrimental, especialmente en sistemas sin suelo donde la interacción raíz-solución es altamente dependiente de condiciones físicas estables.

El promedio ligeramente superior en el sistema acuapónico puede atribuirse a la masa térmica del volumen de agua en recirculación proveniente del RAS, la cual tiende a amortiguar fluctuaciones rápidas, pero puede mantener temperaturas ligeramente más elevadas debido a la actividad metabólica de los peces y la energía térmica acumulada en el sistema hidráulico. No obstante, esta diferencia no alcanzó magnitud suficiente para generar implicaciones fisiológicas negativas.

En cultivos aromáticos como la albahaca, temperaturas superiores a 32-34 °C pueden inducir estrés térmico, alteraciones en la apertura estomática y reducción en la

eficiencia fotosintética. Sin embargo, los picos máximos registrados en el presente estudio fueron transitorios y no persistentes, lo que sugiere ausencia de estrés térmico crónico.

La estabilidad térmica observada coincide con lo reportado en sistemas de cultivo controlado, donde la regulación ambiental contribuye a un desarrollo uniforme y a la reducción de variabilidad fisiológica entre plantas (Sadek *et al.*, 2024). En este contexto, puede inferirse que la temperatura no constituyó un factor limitante en ninguno de los tratamientos, permitiendo que las diferencias productivas, en caso de presentarse, estén asociadas principalmente a la dinámica nutrimental propia de cada sistema.

Humedad relativa

La humedad relativa presentó un valor promedio de 61.85 % durante el periodo experimental, mostrando una tendencia de estabilización progresiva conforme avanzó el ciclo de cultivo (Figura 4). No se observaron fluctuaciones extremas que pudieran inducir condiciones de déficit o exceso de vapor de agua en el ambiente inmediato del dosel vegetal.

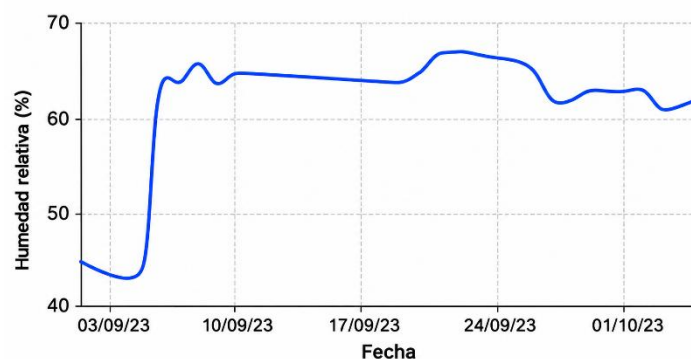


Figura 4. Dinámica temporal de la humedad relativa (%) en sistemas NFT hidropónico y acuapónico durante el cultivo de *Ocimum basilicum* L.

El rango registrado se considera adecuado para el cultivo de *Ocimum basilicum* L., especie que presenta buen desempeño fisiológico bajo condiciones de humedad relativa intermedia (55-70 %). Valores dentro de este intervalo favorecen un balance apropiado entre transpiración y absorción radical, manteniendo gradientes de potencial hídrico que permiten flujo continuo de agua y nutrientes hacia los tejidos en expansión.

En sistemas NFT, donde el suministro hídrico es constante y la zona radical se mantiene en contacto permanente con la lámina nutritiva, la humedad ambiental juega un papel determinante en la regulación estomática y en la tasa transpiratoria. Una humedad excesivamente baja podría incrementar la demanda evaporativa y alterar la relación fuente-sumidero, mientras que valores demasiado altos podrían reducir la transpiración y limitar el flujo masal de nutrientes.

La estabilización progresiva observada durante el periodo experimental sugiere que el microambiente

interno alcanzó un equilibrio dinámico entre evaporación, transpiración y ventilación del sistema. Esta condición es consistente con lo reportado para sistemas de cultivo controlado, donde una humedad relativa moderada contribuye a minimizar el estrés hídrico y a mantener eficiencia fisiológica (Rajaseger *et al.*, 2023).

En consecuencia, la humedad relativa no representó un factor limitante en ninguno de los tratamientos, permitiendo que las diferencias productivas observadas, de existir, estén asociadas principalmente a la dinámica nutrimental y no a restricciones ambientales.

Altura de planta

La altura promedio final fue de 14.64 cm en el sistema hidropónico y 16.43 cm en el sistema acuapónico, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 5A y 5B). La dinámica temporal del crecimiento mostró una tendencia ascendente progresiva en ambos sistemas, sin divergencias consistentes a lo largo del ciclo experimental.

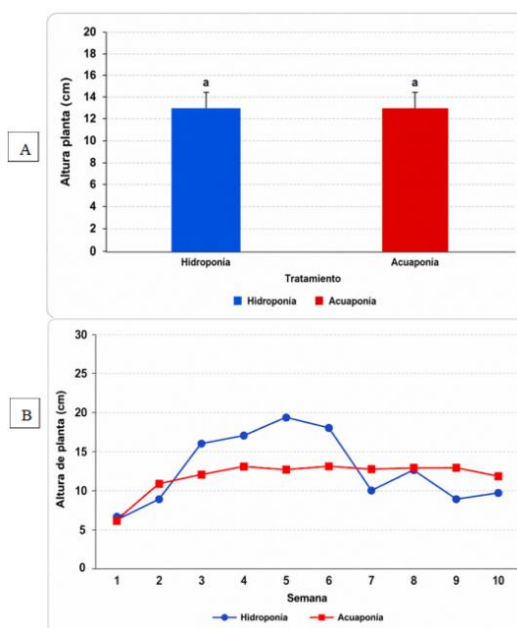


Figura 5. Crecimiento en altura de *Ocimum basilicum* L. en sistemas NFT hidropónico y acuapónico: (A) altura promedio final por tratamiento (media $\pm$ DE, $n = 19$) y (B) dinámica temporal del crecimiento durante el periodo experimental.

La ausencia de diferencias significativas sugiere que ambos sistemas proporcionaron condiciones nutrimentales y ambientales suficientes para sostener un crecimiento vegetativo comparable. Considerando que la conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa se mantuvieron dentro de rangos óptimos, puede inferirse que la disponibilidad hídrica y la estabilidad iónica no actuaron como factores limitantes para la elongación del tallo.

En cultivos de hoja como la albahaca, la altura de planta no siempre responde linealmente a incrementos en concentración nutrimental, ya que el crecimiento vertical depende no solo de disponibilidad de nitrógeno, sino también de la relación fuente–sumidero y del balance hormonal (principalmente auxinas y giberelinas). En este contexto, el ligero incremento observado en acuaponía podría estar asociado a la presencia de compuestos orgánicos disueltos o a variaciones en la forma nitrogenada predominante ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$), aunque dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Diversos estudios han reportado que, bajo suministro constante de nutrientes en sistemas NFT, la albahaca tiende a expresar un crecimiento compacto y eficiente,

priorizando expansión foliar y acumulación de biomasa sobre elongación excesiva del tallo (Knaus *et al.*, 2024). Asimismo, se ha señalado que la estabilidad nutrimental influye más en la eficiencia fotosintética y en la producción de biomasa que en incrementos marcados de altura (Patloková & Pohluda, 2024).

En términos agronómicos, los resultados indican que ambos sistemas sostuvieron un patrón de crecimiento estructural adecuado, sin evidencias de estrés o desequilibrios que promovieran respuestas compensatorias de elongación. Por tanto, la altura de planta no constituyó un indicador diferencial entre sistemas bajo las condiciones evaluadas.

Longitud radical

La longitud radical promedio fue de 13.04 cm en el sistema hidropónico y 13.09 cm en el sistema acuapónico, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 6). La similitud en el desarrollo radical sugiere que ambos sistemas proporcionaron condiciones adecuadas para el establecimiento y funcionamiento del sistema radicular.

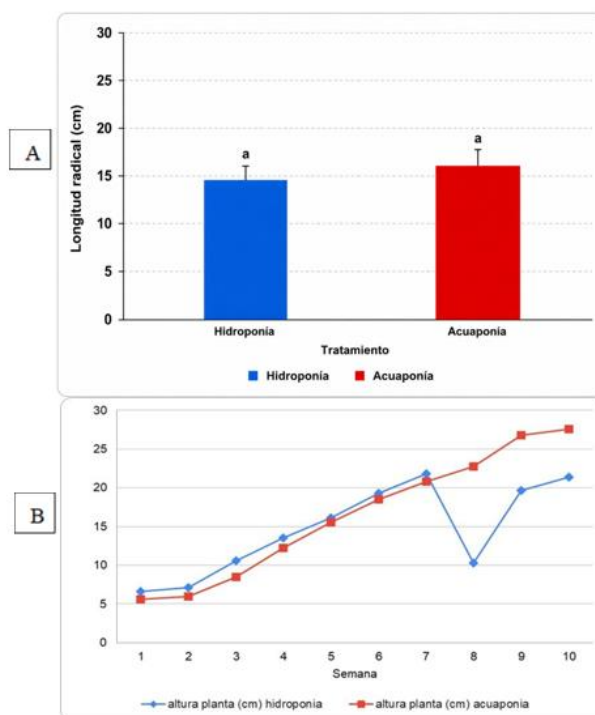


Figura 6. Longitud radical final de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico (media $\pm$ DE, $n = 19$). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

En sistemas NFT, la disponibilidad continua de solución nutritiva reduce la necesidad de exploración radical extensiva, ya que el suministro de agua y nutrientes es constante y homogéneo. Bajo estas condiciones, las plantas tienden a desarrollar sistemas radicales más

compactos, pero altamente funcionales, optimizados para la absorción eficiente más que para la expansión estructural. Este patrón ha sido reportado en cultivos hortícolas bajo hidroponía, donde la eficiencia de

absorción depende más de la estabilidad iónica que de la longitud radical per se (Rajaseger *et al.*, 2023).

En el sistema acuapónico, aunque la dinámica nitrogenada depende de procesos biológicos como la nitrificación y de la tasa metabólica de los peces, no se observaron efectos negativos o limitantes sobre el crecimiento radical. La disponibilidad sostenida de nitrógeno en formas asimilables (principalmente NO_3^-) parece haber sido suficiente para mantener una arquitectura radical comparable a la del sistema hidropónico. Resultados similares han sido reportados en estudios recientes con albahaca cultivada en acuaponía, donde el desarrollo radical no difirió significativamente frente a sistemas hidropónicos bien balanceados (Knaus *et al.*, 2024).

Desde una perspectiva fisiológica, la ausencia de diferencias en longitud radical refuerza la evidencia de que ninguno de los tratamientos generó condiciones de estrés hídrico o nutrimental que indujeran respuestas

compensatorias de proliferación radical. En consecuencia, la eficiencia del sistema radical estuvo determinada más por la estabilidad del entorno rizosférico que por la necesidad de expansión morfológica.

En conjunto, estos resultados indican que tanto el sistema hidropónico como el acuapónico ofrecieron un microambiente adecuado para el desarrollo funcional de la raíz, permitiendo un suministro nutrimental sostenido durante el ciclo de cultivo.

Peso fresco (parte aérea y raíz)

El peso fresco de la parte aérea fue de 23.04 g en el sistema hidropónico y 13.15 g en el sistema acuapónico, mientras que el peso fresco radical fue de 2.82 g y 3.24 g, respectivamente (Figura 7A y 7B). A pesar de la diferencia numérica observada en biomasa aérea, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica alta variabilidad intra tratamiento.

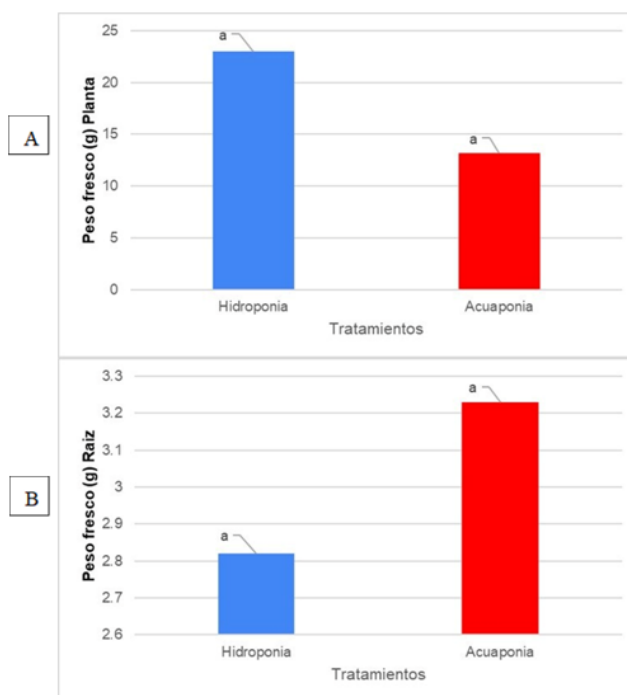


Figura 7. Peso fresco (g) de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico: (A) biomasa aérea y (B) biomasa radical (media $\pm$ DE, $n = 19$). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

La mayor media registrada en hidroponía para la parte aérea podría estar asociada a la formulación nutrimental controlada y al ajuste progresivo de la concentración iónica, lo cual favorece una disponibilidad constante y balanceada de macro y micronutrientes. En contraste, en sistemas acuapónicos la composición nutrimental depende de la dinámica metabólica del sistema acuícola y del equilibrio entre producción de amonio y nitrificación, lo que puede generar variaciones temporales en la proporción de formas nitrogenadas disponibles.

No obstante, la ausencia de diferencias estadísticas sugiere que ambos sistemas fueron capaces de sostener un crecimiento vegetativo funcional bajo las condiciones experimentales establecidas. Es importante considerar que en cultivos de ciclo corto como la albahaca, la biomasa fresca puede presentar alta variabilidad individual debido a diferencias en tasa de expansión foliar y contenido hídrico tisular, factores influenciados por micro variaciones ambientales.

En cuanto al sistema radical, los valores similares entre tratamientos refuerzan la evidencia previamente observada en longitud de raíz, indicando que la absorción hídrica y nutrimental fue adecuada en ambos sistemas. El ligero incremento numérico en biomasa radical en acuaponía podría interpretarse como una respuesta adaptativa a una solución con menor concentración iónica promedio, favoreciendo mayor desarrollo estructural para optimizar absorción, aunque sin implicaciones estadísticas significativas.

Diversos estudios han reportado que, cuando los parámetros fisicoquímicos se mantienen dentro de rangos óptimos, la producción de biomasa en hidroponía y acuaponía puede ser comparable, especialmente en sistemas bien balanceados (Wang *et al.*, 2024). Asimismo, en sistemas acuapónicos de pequeña escala se ha observado que la integración eficiente de peces y plantas permite sostener rendimientos estables sin detrimento significativo en biomasa vegetal (Cuaspa-Benavides *et al.*, 2019).

Desde una perspectiva agronómica, los resultados indican que ambos sistemas fueron capaces de generar biomasa comercialmente viable, aunque la magnitud de las medias sugiere que el sistema hidropónico podría presentar una ventaja productiva bajo condiciones de formulación nutrimental estrictamente controlada. Sin embargo, esta tendencia debe interpretarse con cautela debido a la variabilidad observada y a la estructura experimental.

Peso seco (parte aérea y raíz)

El peso seco de la parte aérea fue de 1.01 g en el sistema hidropónico y 0.58 g en el sistema acuapónico, mientras que el peso seco radical fue de 0.21 g y 0.16 g, respectivamente (Figura 8A y 8B). A pesar de la diferencia numérica observada en biomasa aérea, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica variabilidad intra-tratamiento considerable.

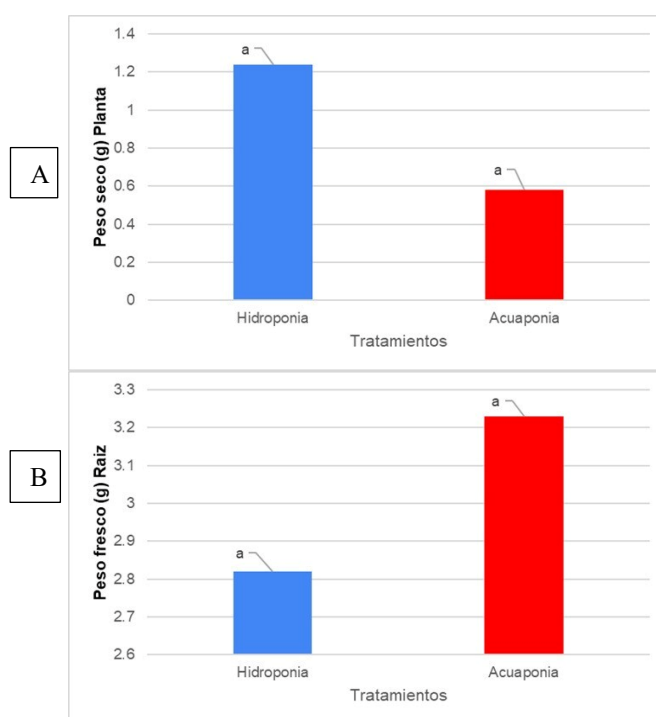


Figura 8. Peso seco (g) de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico: (A) biomasa aérea y (B) biomasa radical (media $\pm$ DE, $n = 19$). No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

El mayor valor promedio en hidroponía sugiere una tendencia hacia mayor acumulación de materia estructural bajo condiciones de formulación nutrimental controlada. En sistemas hidropónicos, el suministro preciso y balanceado de macro y micronutrientes puede optimizar la tasa fotosintética y la eficiencia en conversión de carbono asimilado en biomasa seca. En contraste, en acuaponía, la composición nutrimental depende de procesos biológicos dinámicos, lo que puede generar variaciones en la

proporción de nutrientes disponibles y en la relación entre formas nitrogenadas.

Sin embargo, la ausencia de diferencias estadísticas indica que ambos sistemas fueron capaces de sostener una acumulación estructural comparable bajo las condiciones experimentales establecidas. En cultivos de ciclo corto como la albahaca, pequeñas variaciones en disponibilidad nutrimental pueden no traducirse en diferencias significativas en peso seco cuando las condiciones

ambientales (temperatura, humedad y CE) se mantienen dentro de rangos óptimos.

El comportamiento observado sugiere que la estabilidad fisicoquímica documentada previamente fue suficiente para mantener eficiencia fisiológica en ambos tratamientos. Estudios recientes han señalado que, bajo ambientes controlados, la optimización nutrimental puede mejorar la eficiencia metabólica sin necesariamente generar diferencias estadísticamente detectables en biomasa seca cuando la variabilidad experimental es elevada (Hazrati *et al.*, 2024).

En términos agronómicos, los resultados indican que tanto el sistema hidropónico como el acuapónico permitieron la acumulación de biomasa estructural

funcional. No obstante, la magnitud de las medias sugiere que el control nutrimental estricto podría favorecer una mayor eficiencia en conversión de asimilados en materia seca, aspecto que merece evaluaciones adicionales con mayor nivel de replicación estructural.

Número de hojas

El número promedio de hojas por planta fue de 36.63 en el sistema hidropónico y 33.93 en el sistema acuapónico, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p > 0.05$) (Figura 9). La similitud en esta variable indica que ambos sistemas promovieron un patrón de ramificación y expansión foliar comparable durante el ciclo de cultivo.

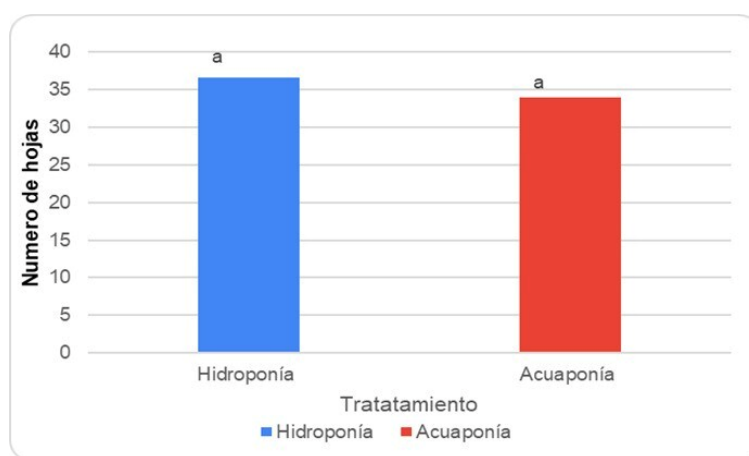


Figura 9. Número de hojas por planta de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico (media $\pm$ DE, $n = 19$). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

En albahaca, el número de hojas constituye un indicador directo del potencial fotosintético y de la capacidad de acumulación de biomasa, dado que el área foliar activa determina la eficiencia en captura de radiación y asimilación de carbono. La ausencia de diferencias sugiere que la disponibilidad nutrimental y las condiciones ambientales previamente descritas (conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa) fueron suficientes para sostener un desarrollo foliar equilibrado en ambos tratamientos.

Aunque el sistema hidropónico presentó valores numéricamente superiores, esta diferencia no fue estadísticamente significativa, lo que refuerza la interpretación de que la dinámica nutrimental del sistema acuapónico no generó limitaciones en la formación de nuevos órganos foliares. En sistemas acuapónicos, pequeñas variaciones en la concentración y proporción de formas nitrogenadas pueden influir en la tasa de emisión foliar; sin embargo, cuando el sistema está adecuadamente

balanceado, estas variaciones no necesariamente se traducen en diferencias productivas marcadas.

La literatura reciente señala que la densidad foliar en albahaca cultivada en acuaponía puede presentar variaciones moderadas asociadas a microfluctuaciones nutrimentales, aunque sin afectar significativamente el rendimiento global ni la eficiencia fotosintética (Patloková & Pokluda, 2024). Los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con dichos reportes.

Desde una perspectiva agronómica, la equivalencia observada en número de hojas respalda la hipótesis de que ambos sistemas proporcionaron condiciones adecuadas para el desarrollo estructural del cultivo, permitiendo una arquitectura vegetal funcional sin indicios de restricción fisiológica.

Área foliar

El área foliar promedio fue de 279.40 cm² en el sistema hidropónico y 680.71 cm² en el sistema acuapónico (Figura 10). A pesar de la marcada diferencia numérica

entre tratamientos, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que evidencia una elevada variabilidad intra-tratamiento.

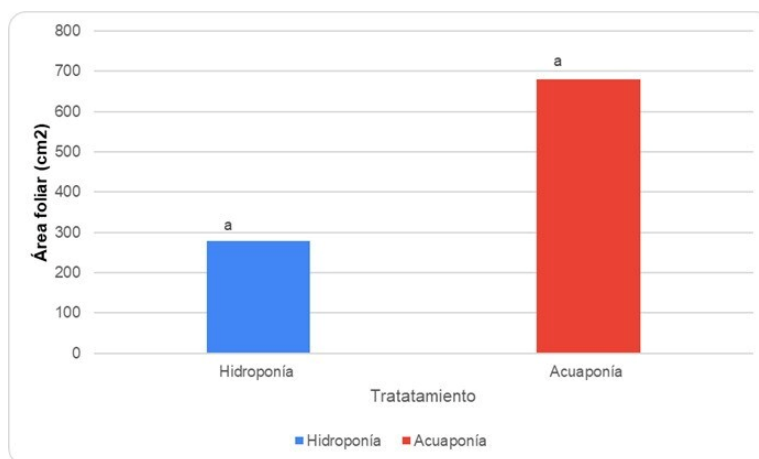


Figura 10. Área foliar (cm²) de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico (media $\pm$ DE, $n = 19$). No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

El mayor valor promedio registrado en acuaponía sugiere una tendencia hacia mayor expansión laminar bajo este sistema. La expansión foliar está estrechamente relacionada con la disponibilidad de nitrógeno y con la capacidad fotosintética, ya que el desarrollo de tejido foliar constituye uno de los principales destinos de asimilados en cultivos de hoja. En sistemas acuapónicos, la presencia continua de nitratos derivados de la nitrificación biológica puede favorecer procesos de expansión celular y acumulación de área fotosintéticamente activa.

Sin embargo, la ausencia de significancia estadística indica que la respuesta no fue consistente entre todas las unidades experimentales. La alta dispersión puede estar asociada a variaciones individuales en arquitectura vegetal, tasa de emisión foliar o diferencias microambientales dentro de la estructura experimental. En cultivos de albahaca, el área foliar suele presentar elevada plasticidad fenotípica, respondiendo rápidamente a pequeñas variaciones en disponibilidad nutrimental y condiciones ambientales.

Es importante señalar que, aunque el área foliar promedio fue mayor en acuaponía, este comportamiento no se tradujo proporcionalmente en mayor acumulación de biomasa seca, lo que sugiere posibles diferencias en

eficiencia fotosintética o en distribución de asimilados. Este desacople entre expansión foliar y acumulación estructural ha sido reportado en sistemas acuapónicos donde la disponibilidad nutrimental es suficiente para sostener crecimiento laminar, pero puede presentar variaciones en balance iónico respecto a soluciones formuladas de manera precisa (Wang *et al.*, 2024).

Desde una perspectiva agronómica, los resultados indican que ambos sistemas fueron capaces de sostener el desarrollo foliar sin restricciones evidentes. No obstante, la magnitud de la diferencia numérica observada sugiere que futuras evaluaciones con mayor replicación estructural permitirían esclarecer si el sistema acuapónico promueve efectivamente una mayor expansión foliar o si el comportamiento responde a variabilidad experimental.

Concentración de clorofila

La concentración promedio de clorofila fue significativamente mayor en el sistema hidropónico (28.25 unidades SPAD) en comparación con el sistema acuapónico (15.74 unidades SPAD) ($p < 0.05$) (Figura 11A y 11B). La dinámica temporal mostró una tendencia consistente de mayor intensidad foliar en el tratamiento hidropónico durante el periodo experimental.

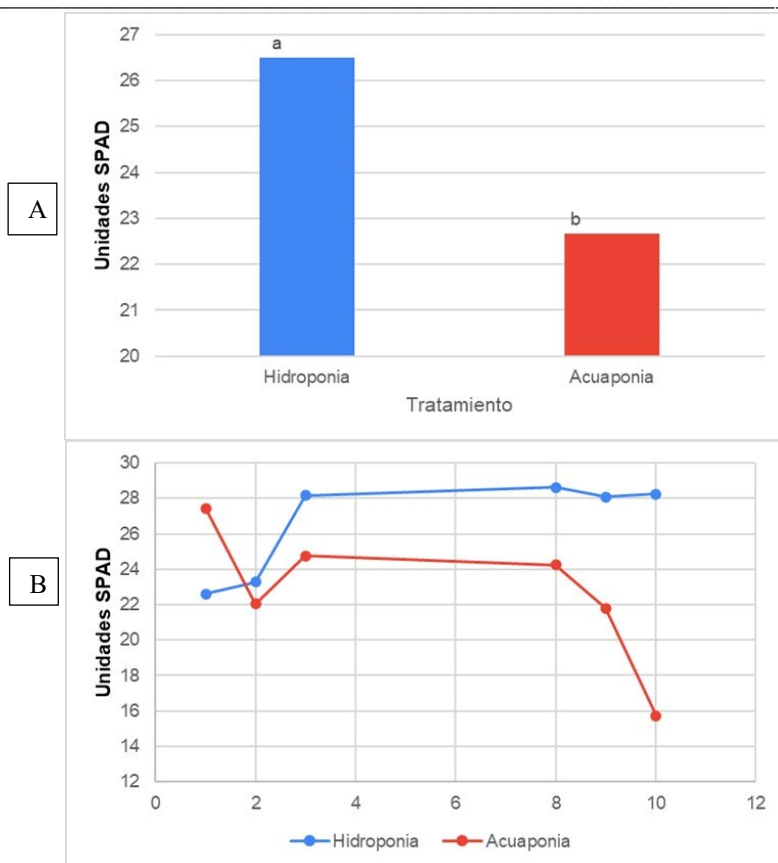


Figura 11. Concentración de clorofila (unidades SPAD) en hojas de *Ocimum basilicum* L. cultivada en sistemas NFT hidropónico y acuapónico: (A) valor promedio final por tratamiento (media $\pm$ DE, $n = 19$) y (B) dinámica temporal durante el periodo experimental. Se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La lectura SPAD constituye un indicador indirecto del contenido foliar de clorofila y, por extensión, del estado nitrogenado de la planta. El nitrógeno es un componente estructural fundamental de la molécula de clorofila y de proteínas asociadas al aparato fotosintético, por lo que su disponibilidad inmediata y estabilidad en la solución nutritiva influye directamente en la intensidad de coloración foliar y en la capacidad fotosintética.

El mayor valor registrado en hidroponía sugiere una mayor disponibilidad efectiva de nitrógeno asimilable, atribuible a la formulación precisa de la solución Hoagland y al control estricto de la conductividad eléctrica y el pH. En contraste, en el sistema acuapónico, la disponibilidad de nitrógeno depende de la mineralización y nitrificación biológica del amonio excretado por los peces. Este proceso, aunque funcional, puede presentar variaciones temporales en la concentración y proporción de formas nitrogenadas ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$), afectando la asimilación inmediata por la planta.

Diversos estudios han demostrado que la concentración de clorofila y la eficiencia fotosintética están estrechamente relacionadas con la forma y estabilidad del nitrógeno disponible en sistemas sin suelo (Hazrati *et al.*, 2024). Asimismo, en acuaponía, la dependencia de procesos microbianos puede generar

mayor variabilidad en la disponibilidad nutrimental, lo que se traduce en diferencias fisiológicas detectables aun cuando la biomasa final no difiera significativamente (Knaus *et al.*, 2024).

Es relevante destacar que, aunque el sistema acuapónico presentó menor concentración de clorofila, esta diferencia no se tradujo en reducciones significativas en biomasa fresca o seca. Este desacople sugiere que el cultivo mantuvo eficiencia funcional suficiente para sostener crecimiento estructural bajo ambas condiciones, posiblemente compensando la menor concentración de clorofila mediante ajustes fisiológicos en distribución de asimilados o eficiencia en uso de nitrógeno.

Desde una perspectiva productiva, los resultados indican que el sistema hidropónico optimiza el estado fisiológico foliar bajo condiciones de nutrición controlada, mientras que el sistema acuapónico, aunque presenta menor intensidad clorofílica, mantiene rendimiento comparable y ofrece ventajas asociadas a sostenibilidad y reutilización de recursos hídricos. La integración de peces y plantas en sistemas recirculantes se alinea con estrategias internacionales orientadas a mejorar la eficiencia en el uso del agua y promover modelos productivos sostenibles (FAO, 2022; Somerville, 2020; Cotler *et al.*, 2020).

Discusión

El presente estudio permitió comparar el desempeño agronómico y fisiológico de *Ocimum basilicum* L. bajo dos sistemas NFT contrastantes en su origen nutrimental: hidroponía con solución formulada y acuaponía basada en efluente de un sistema RAS. En términos generales, ambos sistemas proporcionaron condiciones ambientales y fisicoquímicas estables, lo que se reflejó en un crecimiento estructural comparable en variables como altura, longitud radical, número de hojas y biomasa final.

La estabilidad de la conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa sugiere que el entorno de cultivo no constituyó un factor limitante en ninguno de los tratamientos. Este control ambiental permitió aislar, en gran medida, el efecto del origen nutrimental sobre la respuesta vegetal. Bajo estas condiciones, el crecimiento estructural fue equivalente, lo que indica que la acuaponía fue capaz de sostener un suministro nutrimental suficiente para el desarrollo vegetativo del cultivo.

Sin embargo, la concentración de clorofila mostró diferencias significativas, con valores superiores en hidroponía. Este resultado revela una diferencia fisiológica clara en el estado nitrogenado foliar. La solución hidropónica, al ser formulada y ajustada con precisión, garantizó una disponibilidad inmediata y estable de nitrógeno en forma predominantemente nítrica, favoreciendo la síntesis de clorofila y posiblemente la eficiencia fotosintética. En contraste, la acuaponía depende de procesos biológicos dinámicos, mineralización y nitrificación, que pueden introducir variabilidad temporal en la proporción de formas nitrogenadas disponibles.

Es particularmente interesante que la diferencia fisiológica observada en SPAD no se tradujo en reducciones significativas en biomasa seca o fresca en el sistema acuapónico. Este desacople sugiere que, aunque la intensidad clorofílica fue menor, la eficiencia funcional del aparato fotosintético fue suficiente para sostener crecimiento estructural comparable. En cultivos de ciclo corto como la albahaca, pequeñas variaciones en estado nitrogenado pueden no impactar significativamente la producción final cuando el entorno hídrico y lumínico es adecuado.

La tendencia numérica hacia mayor biomasa en hidroponía y mayor área foliar en acuaponía sugiere diferencias en asignación de recursos y arquitectura vegetal que podrían explorarse con mayor profundidad en estudios futuros. Es posible que el sistema acuapónico favorezca mayor expansión laminar bajo ciertas condiciones, mientras que el hidropónico optimice acumulación estructural por unidad de área foliar. Esta hipótesis requeriría análisis adicionales como tasa

fotosintética neta, eficiencia en uso de nitrógeno y relación fuente-sumidero.

Desde una perspectiva productiva, los resultados indican que ambos sistemas son técnicamente viables para el cultivo de albahaca bajo condiciones controladas. La hidroponía mostró una ventaja fisiológica clara en términos de concentración de clorofila, lo que podría traducirse en mayor estabilidad productiva en sistemas comerciales intensivos. Por otro lado, la acuaponía demostró capacidad para sostener crecimiento y rendimiento comparables, con el valor agregado de integrar producción vegetal y acuícola en un esquema de recirculación eficiente del agua.

No obstante, es importante considerar que cada tratamiento operó dentro de un sistema de recirculación independiente único, lo que limita la inferencia en términos de replicación estructural. Futuros estudios deberían incorporar mayor número de unidades independientes por tratamiento para fortalecer la robustez estadística y explorar con mayor precisión las diferencias fisiológicas observadas.

En conjunto, los resultados contribuyen a la comprensión comparativa del desempeño de sistemas NFT hidropónicos y acuapónicos en cultivos aromáticos de ciclo corto, destacando que la acuaponía puede constituir una alternativa productiva sostenible sin comprometer significativamente el rendimiento vegetal.

Conclusiones

Bajo las condiciones experimentales evaluadas, tanto el sistema hidropónico como el acuapónico permitieron el desarrollo adecuado de *Ocimum basilicum* L., sin diferencias significativas en variables de crecimiento estructural y biomasa final.

El sistema hidropónico presentó mayor concentración de clorofila, indicando una disponibilidad nitrogenada más estable y directa. Sin embargo, esta ventaja fisiológica no se tradujo en incrementos estadísticamente significativos en biomasa respecto al sistema acuapónico.

La acuaponía demostró ser una alternativa técnicamente viable para la producción de albahaca bajo condiciones controladas, manteniendo rendimiento comparable al sistema hidropónico y ofreciendo beneficios asociados a la integración productiva y eficiencia en el uso del agua.

Se recomienda ampliar la replicación estructural y profundizar en evaluaciones fisiológicas y nutrimentales para esclarecer las diferencias observadas en estado nitrogenado y expansión foliar.

Referencias

- Castañares, J. L. (2020). Producción de cultivos hortícolas en sistemas sin suelo: Bases fisiológicas y productivas. *Horticultura Argentina*, 39(98), 15–27.

- Cotler, H., Garrido, A., & Bunge, V. (2020). Seguridad alimentaria, recursos naturales y sostenibilidad agrícola. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 33, 1–14.
- Cuaspa-Benavides, J. A., Guerrero-Bastidas, D. D., & Burgos-Arcos, A. J. (2019). Sistemas acuapónicos como alternativa sustentable en la acuicultura. *Revista Investigación Pecuaria*, 6(1). <https://doi.org/10.22267/revip.1961.9>
- FAO. (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Hazrati, S., Pignata, G., Casale, M., Binello, A., Cravotto, G., Devecchi, M., & Nicola, S. (2024). Impact of four hydroponic nutrient solutions and regrowth on yield, safety and essential oil profile of basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivated in soilless culture systems. *Folia Horticulturae*, 36(4), 517–531. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0034>
- Knaus, U., Hübner, D. H. D., Küchenmeister, C., *et al.* (2024). Aquaponic growth of basil (*Ocimum basilicum*) with African catfish (*Clarias gariepinus*) in standard substrate combined with a humic acid fiber substrate (HFS). *Scientific Reports*, 14, 17725. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68361-3>
- Patloková, K., & Pohluda, R. (2024). Optimization of plant nutrition in aquaponics: The impact of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus mojavensis* on lettuce and basil yield and mineral status. *Plants*, 13(2), 291. <https://doi.org/10.3390/plants13020291>
- Rajaseger, G., Chan, K. L., Tan, K. Y., Ramasamy, S., Khin, M. C., Anburaj, A., *et al.* (2023). Hydroponics: Current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, 19(9), 925–938. <https://doi.org/10.6026/97320630019925>
- Sadek, N., Kamal, N., & Shehata, D. (2024). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102341. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>
- Somerville, C. (2020). Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021e>
- Wang, Y., Yang, Y., & Lu, J. (2024). A review of aquaponics: Concept, current situation and development. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 51(3), 140–156. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v51i3.2554>