



Producción acuapónica de tilapia y lechuga en regiones semiáridas: eficiencia hídrica y reciclaje de nutrientes †

[Acuaponic production of tilapia and lettuce in semi-arid regions: water efficiency and nutrient recycling]

María Gabriela Cervantes-Vázquez¹,
Tomás Juan Álvaro Cervantes-Vázquez¹, J. Guadalupe Luna-Ortega²,
Magdalena Galindo-Guzmán², Alma Patricia Galindo-Guzmán²,
Anselmo González-Torres³ and Juan Luis Ríos-Plaza^{2*}

¹Facultad de Agricultura y Zootecnia UJED, Carretera Gómez Palacio - Tlahualilo Km. 32. Venecia, C.P. 35110. Gómez Palacio, Durango, México.

Email: cevga@hotmail.com, alvaro87tomas@hotmail.com

²Universidad Politécnica de la Región Laguna, Calle Sin Nombre Sin Número Ejido Santa Teresa, C.P. 27942. San Pedro de las Colonias, Coahuila, México.

Email: lupe_lunao@yahoo.com.mx, magda.galindo@uprl.edu.mx,
alma.galindo@docentes.uprl.edu.mx, juan.rios@uprl.edu.mx *

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Periférico Raúl López Sánchez s/n, Valle Verde C.P. 27059. Torreón, Coahuila, México. Email:

anselgons@hotmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background: Water scarcity and food insecurity in arid regions such as the Comarca Lagunera demand sustainable production models. Aquaponics, integrating fish and plants in a closed-loop system, emerges as a viable alternative to optimize resources and strengthen food self-sufficiency in rural areas. **Objective:** To evaluate the productive performance, water efficiency, and technical and economic feasibility of a low-cost aquaponic system combining tilapia (*Oreochromis niloticus*) and lettuce (*Lactuca sativa*) under semi-arid conditions. **Methods:** Three production systems were compared under semi-controlled conditions for 18 weeks: aquaponics (fish and plants), aquaculture (fish only), and hydroponics (plants only). Growth performance, water consumption, nutrient recycling, and operating costs were analyzed. **Results:** The aquaponic system increased final tilapia weight by 22.3%, lettuce root development by 28%, and reduced water use by 30% compared to hydroponics, while achieving 89.3% nitrate absorption and 38.5% lower operating costs. **Implications:** The results demonstrate that aquaponics can improve water-use efficiency, reduce the use of fertilizers and plastics, and promote circular economy models applicable in rural communities with limited resources. **Conclusions:** Aquaponics is a technically and economically feasible alternative for semi-arid regions, integrating water efficiency, nutrient recycling, and sustainable food production, contributing to food security and local resilience.

Key words: aquaponics; water efficiency; tilapia; rural sustainability.

RESUMEN

Antecedentes: La escasez de agua y la inseguridad alimentaria en regiones áridas como la Comarca Lagunera demandan modelos productivos sostenibles. La acuaponía, al integrar peces y plantas en un sistema cerrado, se plantea como alternativa viable para optimizar recursos y fortalecer la autosuficiencia alimentaria en comunidades rurales. **Objetivo:** Evaluar el rendimiento productivo, la eficiencia hídrica y la viabilidad técnica y económica de un sistema acuapónico de bajo costo que combina la producción de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*) y lechuga tipo orejona (*Lactuca sativa*) en condiciones semiáridas. **Métodos:** Se compararon tres sistemas de producción bajo condiciones semi-controladas durante 18 semanas: acuaponía (peces y plantas), acuacultura (solo peces) e

† Submitted August 1, 2025 – Accepted October 10, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6480>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = A. González-Torres: <http://orcid.org/0000-0002-4530-5268>; J.L. Ríos-Plaza: <http://orcid.org/0000-0002-8724-5849>

hidroponía (solo plantas), evaluando variables de crecimiento, consumo de agua, reciclaje de nutrientes y costos operativos. **Resultados:** El sistema acuapónico incrementó el peso final de tilapia en 22.3%, el desarrollo radicular de lechuga en 28% y redujo el consumo hídrico en 30% respecto a la hidroponía. Además, absorbió el 89.3% de los nitratos y disminuyó en 38.5% los costos operativos. **Implicaciones:** Los resultados evidencian que la acuaponía puede mejorar la eficiencia en el uso del agua, reducir el empleo de fertilizantes y plásticos, y promover modelos de economía circular aplicables en comunidades rurales con recursos limitados. **Conclusiones:** La acuaponía representa una alternativa técnica y económicamente viable para regiones semiáridas, al integrar eficiencia hídrica, reciclaje de nutrientes y producción sustentable de alimentos, contribuyendo a la seguridad alimentaria y la resiliencia local.

Palabras clave: acuaponía; eficiencia hídrica; tilapia; sustentabilidad rural.

INTRODUCCION

La creciente presión sobre los sistemas agroalimentarios, derivada del cambio climático, la escasez hídrica y el aumento poblacional, ha incentivado la búsqueda de modelos productivos sostenibles que optimicen el uso de recursos sin comprometer la seguridad alimentaria (FAO, 2023). En este contexto, la acuaponía —un sistema integrado que combina la acuicultura y la hidroponía en un ciclo cerrado de reciclaje de agua y nutrientes— ha surgido como una alternativa tecnológica prometedora para regiones con recursos limitados (Kloas *et al.*, 2015). Este sistema simbiótico permite cultivar plantas utilizando los desechos metabólicos de los peces como fuente natural de nutrientes, mientras que las plantas contribuyen a depurar el agua, cerrando así el ciclo productivo sin necesidad de fertilizantes sintéticos ni recambios hídricos frecuentes (Junge *et al.*, 2017). Estudios recientes han demostrado que los sistemas acuapónicos pueden reducir el consumo de agua hasta en un 90 % en comparación con la agricultura convencional, y mejorar la eficiencia nutrimental a través del reciclaje activo de compuestos nitrogenados (Baganz *et al.*, 2023; Yogev *et al.*, 2021). Sin embargo, su aplicación a pequeña escala en entornos rurales continúa siendo limitada, especialmente en regiones donde la transferencia tecnológica, la disponibilidad de insumos y el acceso a financiamiento son restringidos. Aunque existen experiencias internacionales exitosas de acuaponía rural en países como Perú, Tailandia o Uganda (Somerville *et al.*, 2014), en el contexto mexicano persiste una carencia crítica de evidencia empírica sobre el desempeño técnico-productivo de sistemas acuapónicos adaptados a condiciones semiáridas, con acceso limitado a tecnología y capital. En México, particularmente en la Comarca Lagunera —una región con precipitación media anual inferior a 250 mm y altos índices de marginación y vulnerabilidad alimentaria—, no se ha documentado aún la implementación formal de sistemas acuapónicos orientados a fortalecer la

autosuficiencia de comunidades rurales (CONAGUA, 2023; INEGI, 2020). Este vacío no se limita a la ausencia de aplicaciones prácticas, sino que refleja una falta de estudios experimentales que evalúen el rendimiento productivo, la eficiencia hídrica real y la viabilidad técnica de modelos que utilicen materiales locales, accesibles y de bajo costo, bajo condiciones ambientales representativas de entornos rurales. El presente estudio se desarrolló en el invernadero experimental de la Universidad Politécnica de la Región Laguna, bajo condiciones ambientales típicas de la región semiárida: con temperaturas ambientales que oscilaron entre 18 °C y 36 °C y humedad relativa promedio del 40 % al 65 % durante el ciclo experimental. Estos parámetros influyen directamente en la tasa de evaporación, el estrés térmico en los peces y el crecimiento vegetal, lo que refuerza el enfoque realista y aplicado del diseño, al replicar condiciones comunes en agricultura rural sin control climático activo. Un aspecto distintivo de este trabajo es su enfoque en la aplicabilidad local, mediante el uso de materiales de bajo costo y amplia disponibilidad regional. En particular, el empleo de estropajos naturales (*Luffa cylindrica*) como sustrato de soporte vegetal representa una innovación metodológica clave: este material orgánico, biodegradable y fácilmente accesible, sustituye insumos convencionales como canicas de arcilla o espumas sintéticas, reduciendo significativamente los costos iniciales de implementación. Además, su estructura porosa favorece la retención de nutrientes y el drenaje adecuado, contribuyendo a la salud radicular de las plantas. Al evitar el uso de plásticos o insumos importados, esta estrategia no solo mejora la sostenibilidad del sistema, sino que también potencia su replicabilidad en comunidades rurales con recursos económicos y tecnológicos limitados. Así, el diseño del sistema se alinea con principios de economía circular y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, particularmente aquellos relacionados con la producción responsable, la acción climática y el hambre cero. Además, el sistema fue diseñado para optimizar empíricamente

la relación pez-planta, con el fin de maximizar la conversión de desechos acuícolas en nutrientes vegetales y minimizar la dependencia de insumos químicos. Su desempeño se evaluó mediante comparación directa con sistemas de hidroponía convencional (solo lechuga) y acuicultura independiente (solo tilapia), en un diseño experimental controlado que permitió cuantificar diferencias en productividad, eficiencia hídrica y calidad del agua. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento productivo, la eficiencia hídrica y la viabilidad técnica de un sistema acuapónico integrado que combina la producción de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*) y lechuga tipo orejona (*Lactuca sativa*) en condiciones rurales semiáridas, utilizando materiales de bajo costo y técnicas accesibles. Los hallazgos aportan evidencia empírica relevante para el diseño de estrategias de producción alimentaria resiliente, escalable y replicable en contextos de escasez hídrica, marginación y alta inseguridad alimentaria.

MATERIALES Y METODOS

Localización del experimento

El estudio se realizó en un invernadero experimental tipo túnel de la Universidad Politécnica de la Región Laguna, ubicado en San Pedro de las Colonias, Coahuila, México (25° 46' 59" N, 103° 11' 37" O; altitud 1,100 msnm). El invernadero tenía una estructura metálica de 12 × 6 m, cubierta con polietileno traslúcido y ventilación lateral pasiva, replicando condiciones de baja tecnología típicas en entornos rurales. Durante el ciclo experimental (18 semanas) la temperatura ambiente osciló entre 18 y 36 °C, con humedad relativa entre 40 y 65 %. Estas variables se monitorearon con un registrador digital Inkbird® ITH-20 (precisión ±1 °C y ±5 % HR), instalado en el centro del invernadero y programado para lecturas cada 60 minutos.

Diseño experimental

Cada unidad experimental consistió en una estructura independiente de 2.5 m² equipada con una alberca plástica de 2,500 litros. En los sistemas acuapónico y acuícola, se introdujeron 500 alevines de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*) de tamaño homogéneo (3.5 ± 0.2 cm de longitud; 10 ± 0.5 g de peso inicial), mientras que los sistemas acuapónico e hidropónico incluyeron 108 plántulas de lechuga tipo orejona (*Lactuca sativa*), establecidas a una densidad de 43.2

plantas/m². Las lechugas fueron germinadas previamente en charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando turba como sustrato inicial, y trasplantadas al sistema cuando presentaban de 4 a 5 hojas verdaderas.

El sistema hidropónico operó bajo el principio de Nutrient Film Technique (NFT), utilizando una solución nutritiva comercial (Hydro-Gro®) con formulación balanceada (CE inicial: 1.8–2.0 dS/m, pH: 5.8–6.2). En lugar de renovar completamente la solución cada semana, se implementó un manejo por reposición progresiva diaria, compatible con condiciones de bajo costo o rusticidad. Cada día, se rellenó el sistema con agua fresca para compensar las pérdidas por evapotranspiración y absorción vegetal, y se ajustó la conductividad eléctrica mediante la adición controlada de solución nutritiva concentrada (Hydro-Gro®), siguiendo las recomendaciones del fabricante. El pH se monitoreó y corrigió diariamente utilizando ácido cítrico diluido, manteniéndolo dentro del rango óptimo. Este manejo permitió mantener un equilibrio nutrimental estable sin necesidad de descartar toda la solución de forma frecuente. Como medida preventiva para evitar la acumulación de sales tóxicas o desequilibrios iónicos, se realizó una renovación completa del sistema cada 4 semanas, reemplazando la solución usada por una nueva preparada ex profeso. Este enfoque combinado optimizó el uso de recursos, redujo costos y minimizó impactos ambientales, sin comprometer el desarrollo vegetal.

En el sistema acuapónico, el agua rica en amonio procedente del módulo piscícola fue bombeada hacia un biofiltro mecánico-biológico compuesto por anillos plásticos comerciales de alta superficie específica (diámetro 10 cm, superficie específica aproximada de 300 m²/m³), dispuestos en un tanque de 0.5 m³ de volumen. Esta configuración proporcionó una superficie total estimada de 150 m² para la colonización de bacterias nitrificantes, facilitando la conversión eficiente de amonio (NH₄⁺) en nitratos (NO₃⁻) disponibles para las plantas (Bittsanszky *et al.*, 2016).

La circulación del agua fue continua (24/7) mediante bombas sumergibles de 80 W, con un caudal promedio de 1,000 L/h. El flujo de agua desde el módulo piscícola hacia el vegetal, junto con el retorno de agua depurada al tanque de peces, se ilustra en la Figura 1.

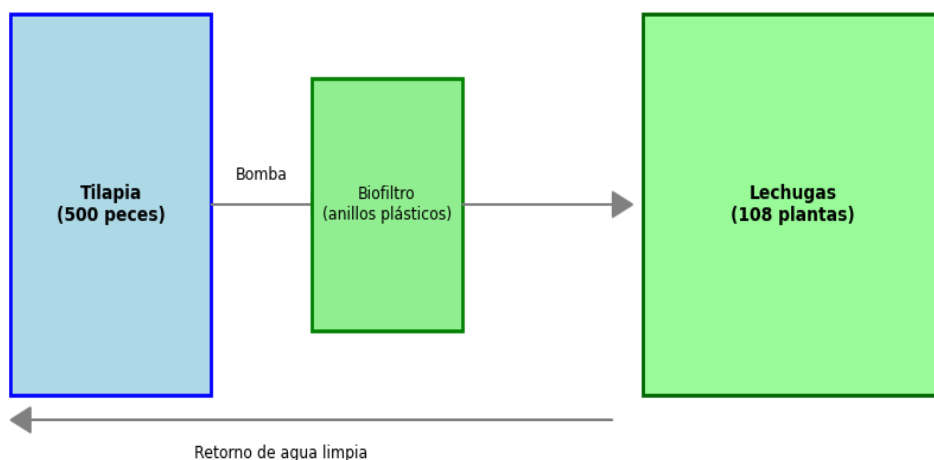


Figura 1. Diseño esquemático del sistema acuapónico.

En el sistema acuapónico, las raíces se fijaron usando estropajos naturales secos (*Luffa cylindrica*), previamente procesados para garantizar higiene y funcionalidad. Para ello, se extrajeron las semillas de la *luffa* madura y se cortaron tiras de aproximadamente 4 cm de altura y 10–12 cm de longitud. Posteriormente, cada tira fue desinfectada mediante inmersión en una solución de agua y cloro (50 ppm) durante 30 minutos, seguida de enjuague con agua potable y secado al sol durante 1 hora. Una vez procesadas, las tiras se enrollaron alrededor del cepellón de la planta (previamente limpio) en el momento del trasplante, asegurando un soporte adecuado dentro de flotadores de poliuretano con orificios de 2 pulgadas. En la hidroponía se empleó espuma fenólica.

Los peces fueron alimentados diariamente con alimento comercial Bluefish® (30 % de proteína bruta), formulado para la fase de crecimiento, en una proporción equivalente al 3 % de su peso corporal. Esta ración se ajustó semanalmente mediante muestreo aleatorio de la biomasa. Para garantizar una estimación representativa, se seleccionaron al azar 50 individuos por tratamiento (acuaponía y acuacultura independiente), lo que representó el 10 % de la población inicial (500 peces por sistema). Cada pez fue pesado individualmente con una balanza digital Ohaus Scout® (precisión ± 0.1 g) y devuelto al sistema tras el registro. Con base en estos datos, se calculó la biomasa promedio del grupo para ajustar la cantidad diaria de alimento. Este procedimiento, aplicado durante las 18 semanas del experimento, permitió optimizar la conversión alimenticia y reducir la carga orgánica asociada a la

sobrealimentación. Durante este periodo, fue posible completar dos ciclos sucesivos de cultivo de lechuga (9 semanas cada uno), con monitoreo continuo de los parámetros productivos y ambientales.

Medición de variables

Durante todo el periodo experimental, se registraron semanalmente los parámetros fisicoquímicos del agua: pH, temperatura, oxígeno disuelto, concentración de amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). Estos análisis se realizaron utilizando equipos portátiles: multiparámetro Hanna HI98107, fotómetro Hach DR3900 y sonda multiparamétrica YSI ProDSS. En el componente vegetal, se midieron altura de planta, diámetro del tallo, número de hojas y longitud radicular, utilizando cinta métrica y regla metálica. Para los peces, se evaluaron semanalmente longitud total, ancho, grosor y peso corporal individual, con calibrador digital Mitutoyo® y balanza Ohaus Scout® (precisión de ± 0.1 g).

Análisis de datos

Los datos se analizaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de significancia de $p < 0.05$, seguido de pruebas post-hoc de Tukey. También se calcularon coeficientes de correlación de Pearson entre variables nutricionales y productivas, utilizando el software IBM SPSS Statistics v.28, con validación gráfica en OriginPro v.2023b.

RESULTADOS Y DISCUSION

Desempeño productivo del componente piscícola

El análisis del crecimiento de *Oreochromis niloticus* evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0.01$). Como se muestra en la Figura 2, los organismos criados en el sistema acuapónico alcanzaron un peso final promedio de 597.6 ± 21.4 g, mientras que aquellos en acuicultura convencional registraron 491.5 ± 19.2 g, lo que representa un incremento del 22.3% en el rendimiento del sistema integrado. Esta mejora puede atribuirse a diversos factores interrelacionados dentro del ecosistema acuapónico.

En primer lugar, la mayor estabilidad fisicoquímica del agua observada en el sistema acuapónico desempeñó un papel crucial. A lo largo del ciclo de cultivo no se detectaron acumulaciones críticas de amonio ni fluctuaciones abruptas de pH, lo que favoreció condiciones de baja toxicidad y mayor confort fisiológico para los peces (Timmons *et al.*, 2018). La presencia de un sistema vegetal activo (lechuga) facilitó la biofiltración natural del agua, reduciendo las concentraciones de compuestos nitrogenados mediante la absorción continua de nitratos, lo cual contribuye a mejorar la calidad del entorno acuático sin requerir filtración mecánica externa (Baganz *et al.*, 2021).

Más allá de la simple reducción de tóxicos, este entorno estable promovió una mejor eficiencia

metabólica en los peces. Al minimizarse el estrés fisiológico derivado de contaminantes nitrogenados, se redujo el gasto energético en procesos de defensa celular y reparación tisular, permitiendo que una mayor proporción de energía proveniente del alimento se destine al crecimiento y deposición de biomasa (Zou *et al.*, 2023). El adecuado control del oxígeno disuelto y del pH optimizó la actividad enzimática digestiva, favoreciendo una mayor absorción de nutrientes y, por lo tanto, una mejora en la conversión alimenticia (FCR), como se observa en el Tabla 1. Estudios previos han demostrado que incluso pequeñas variaciones en la calidad del agua pueden alterar la función gastrointestinal y reducir la eficiencia de utilización del alimento (Liu *et al.*, 2020). Esto explica por qué el sistema acuapónico, con su equilibrio biológico sostenido, presentó una FCR significativamente menor en comparación con la acuicultura convencional, además de un mayor peso final, longitud total y porcentaje de sobrevivencia.

La mayor eficiencia en la conversión alimenticia se reflejó también en otros parámetros zootécnicos. El crecimiento específico fue más alto en acuaponía, la longitud total final fue significativamente mayor (20.9 cm vs. 18.3 cm), lo cual refuerza la hipótesis de que las condiciones integradas favorecen tanto el crecimiento somático como la eficiencia metabólica. Asimismo, se registró un porcentaje de sobrevivencia superior (94.2 %) en comparación con la acuicultura (90.1 %), lo que sugiere un entorno más estable y biológicamente equilibrado.

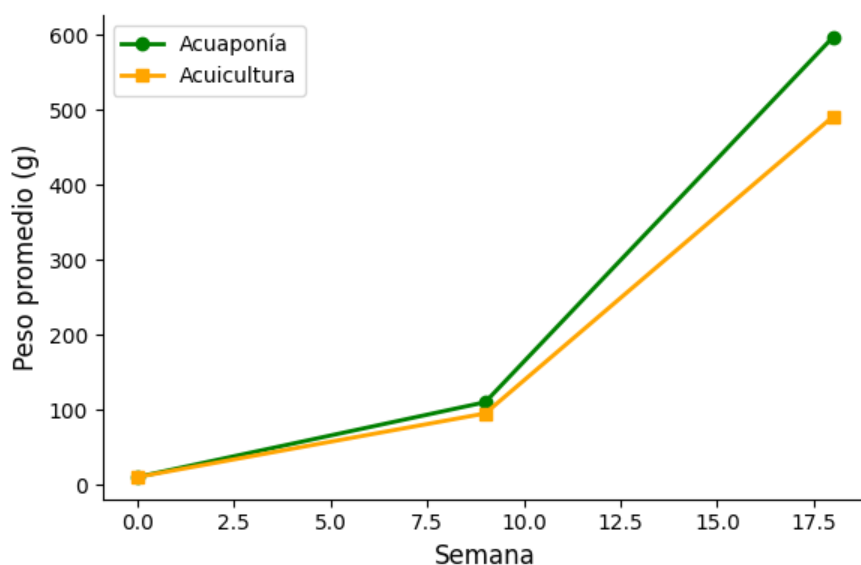


Figura 2. Comparación del peso promedio (g) de tilapia en ambos sistemas durante el experimento.

Tabla 1. Comparación de parámetros productivos de tilapia al final del experimento.

Parámetro	Acuaponía	Acuicultura
Peso final promedio (g)	597.6 ± 18 a	491.5 ± 22.1 b
Conversión alimenticia (FCR)	1.32 ± 0.07 a	1.58 ± 0.11 b
Longitud total final (cm)	20.9 ± 0.8 a	18.3 ± 1.0 b
Porcentaje de sobrevivencia (%)	94.2 ± 2.1 a	90.1 ± 1.1 b

Los valores representan la media ± desviación estándar. Medias seguidas por letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

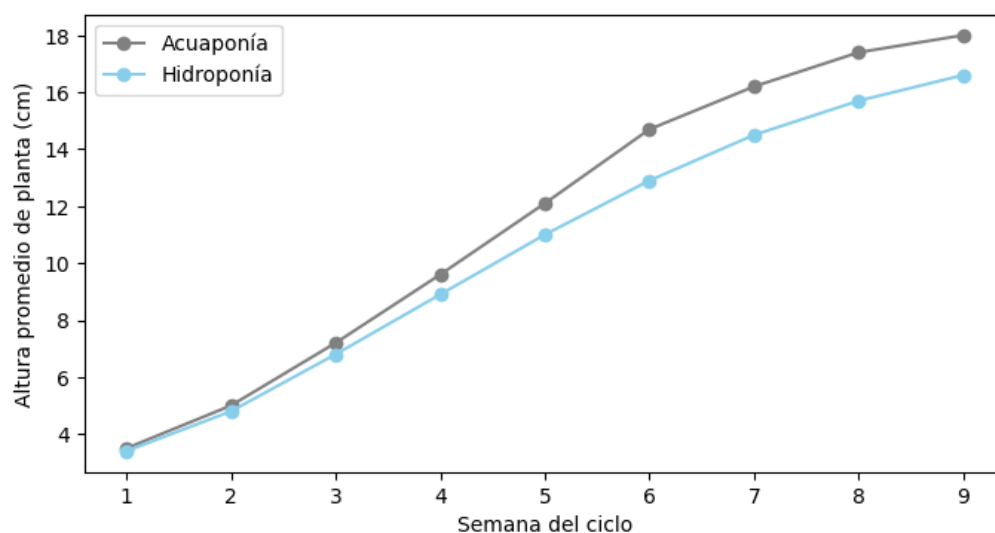
Estos hallazgos coinciden con estudios recientes en sistemas acuapónicos de climas cálidos, donde se ha documentado una mejora sostenida del rendimiento piscícola sin comprometer la calidad del agua ni requerir recambios frecuentes (Zou *et al.*, 2023). En conjunto, los datos obtenidos respaldan la eficacia técnica del sistema acuapónico, tanto en términos productivos como ambientales, lo que lo convierte en una opción estratégica para el desarrollo de sistemas agroalimentarios resilientes en regiones con recursos limitados.

Comportamiento agronómico del componente vegetal

El análisis comparativo del componente hortícola evidenció ventajas agronómicas en el sistema acuapónico, especialmente en parámetros asociados al desarrollo radicular y la calidad del follaje. Si bien no todas las variables mostraron diferencias estadísticamente significativas, los patrones de crecimiento fueron consistentes a favor de la acuaponía. La altura final promedio de las plantas fue de 18.3 ± 1.1 cm en acuaponía frente a 16.5 ± 1.2 cm

en hidroponía ($p = 0.12$), mientras que el desarrollo radicular fue significativamente superior en el sistema acuapónico (22.3 ± 1.8 cm vs. 17.2 ± 2.0 cm, $p < 0.01$), como se muestra en la Figura 4. Este patrón refleja un entorno nutricional más balanceado, derivado de la liberación progresiva de nitrógeno en forma de nitratos a partir del metabolismo piscícola, y de una mejor oxigenación de la rizosfera debido al flujo continuo de agua reciclada (Zou *et al.*, 2023; Baganz *et al.*, 2021).

La evolución semanal del crecimiento reveló una cinética diferenciada entre ambos sistemas: mientras que en hidroponía el crecimiento fue lineal y constante, en acuaponía se observó una aceleración progresiva a partir de la semana 4, especialmente evidente en las últimas tres semanas del ciclo. Esta diferencia sugiere que el entorno nutricional en acuaponía no solo proporciona nutrientes, sino que también favorece una respuesta fisiológica más dinámica en las plantas, posiblemente debido a una liberación gradual de nitratos y otros micronutrientes desde los desechos metabólicos de los peces.

**Figura 3. Evolución semanal del crecimiento de lechuga (cm) en acuaponía e hidroponía.**

Además, se observó una mayor uniformidad foliar, tanto en el número como en el tamaño de las hojas, y una textura más firme y turgente en los tratamientos acuapónicos. Estas características se asocian a una disponibilidad más estable de microelementos clave como hierro (Fe), magnesio (Mg) y manganeso (Mn), que están presentes en los residuos metabólicos de los peces y que pueden ser aprovechados eficientemente por cultivos de ciclo corto como *Lactuca sativa* (Bittsanszky *et al.*, 2016; Lennard, 2022). Sin embargo, es importante destacar que en este estudio no se realizaron análisis específicos de concentración de Fe, Mg ni Mn en el agua, por lo que la presencia de estos micronutrientes se infirió indirectamente a partir de la calidad del follaje y la ausencia de síntomas clásicos de deficiencia. Esta limitación sugiere que, aunque el sistema acuapónico proporcionó condiciones favorables para el crecimiento vegetal, futuros estudios deberían incluir la cuantificación de estos elementos para confirmar su aporte efectivo.

Desde una perspectiva agronómica, este comportamiento indica que los sistemas acuapónicos no solo pueden igualar el rendimiento estructural de los sistemas hidropónicos comerciales, sino incluso superarlos en condiciones semicontroladas, siempre que se mantenga el equilibrio biológico del sistema. A pesar de la no significancia estadística en la altura de planta, la mejora observada en raíces y calidad foliar sugiere una respuesta más eficiente del cultivo a un entorno más diverso y ecológicamente activo.

Los principales parámetros fisiológicos medidos en *Lactuca sativa* al finalizar el ciclo se presentan en el Tabla 2, donde se evidencia un mejor desempeño en el sistema acuapónico, especialmente en la longitud de raíz, diámetro de tallo y textura foliar.

Eficiencia hídrica y reciclaje de nutrientes

Uno de los hallazgos más relevantes del presente estudio fue la notable eficiencia hídrica alcanzada por el sistema acuapónico. Durante las 18 semanas el sistema acuapónico consumió en promedio 550 L semanales, el hidropónico 750 L semanales y el

acuícola independiente 600 L semanales, lo que representa un ahorro de agua del 30 % respecto al hidropónico y del 8 % respecto al acuícola. Esta diferencia puede atribuirse principalmente a dos factores: en primer lugar, el sistema hidropónico operó bajo el principio de Nutrient Film Technique (NFT), donde el agua fluye continuamente por canales abiertos y expuestos al ambiente, lo que favorece una alta tasa de evaporación debido a las condiciones semiáridas del invernadero (temperaturas hasta 34 °C y baja humedad relativa). Además, parte del agua se pierde por drenaje no recuperado, ya que no se recicla dentro del sistema y por el recambio semanal que se realiza para ajustar la solución nutritiva.

En contraste, el sistema acuapónico recicla el 98% del agua mediante una circulación cerrada entre el módulo piscícola y el vegetal, minimizando pérdidas por evaporación y drenaje. Aunque el agua también se evapora en el módulo vegetal, su recirculación constante reduce significativamente el volumen neto perdido. Estudios han demostrado que los sistemas de flujo abierto como el NFT pueden perder hasta un 20–30% del agua por evaporación diaria en climas cálidos (Yogev *et al.*, 2021), lo cual explica parcialmente la mayor demanda hídrica observada en este tratamiento.

La notable eficiencia en el manejo de nutrientes del sistema acuapónico se evidenció en los resultados de la Figura 4, donde se observa que los niveles de nitratos se mantuvieron consistentemente dentro del rango óptimo para el cultivo de lechugas (20–40 ppm) durante el 83% del ciclo productivo. Este rango, recomendado por Yogev *et al.* (2021), favorece tanto el crecimiento vegetal como la salud de los peces, demostrando un equilibrio biológico sostenido. Particularmente destacable es el pico de 40 ppm registrado en la semana 9, que coincide con la cosecha del primer ciclo de lechugas, momento en el cual se realizó una renovación de plantas en el sistema. Esta intervención fue seguida de una rápida disminución a 28 ppm en la semana 10, lo que evidencia una eficiente absorción radicular por parte de las nuevas plántulas.

Tabla 2. Comparación de parámetros fisiológicos de lechuga por tratamiento.

Parámetro	Acuaponía	Hidroponía	p-valor
Altura de planta (cm)	18.3 ± 1.1	16.5 ± 1.2	0.12
Longitud radicular (cm)	22.3 ± 1.8 a	17.2 ± 2.0 b	<0.01
Número de hojas	13.9 ± 1.2	13.4 ± 1.4	0.28
Diámetro de tallo (cm)	1.96 ± 0.2 a	1.61 ± 0.3 b	0.04
Textura foliar (escala 1–5)	4.7 ± 0.3 a	4.2 ± 0.4 b	0.05

Los datos representan la media ± desviación estándar, letras distintas en la misma fila difieren significativamente ($p < 0.05$). La ausencia de letras indica que no hubo diferencias significativas.

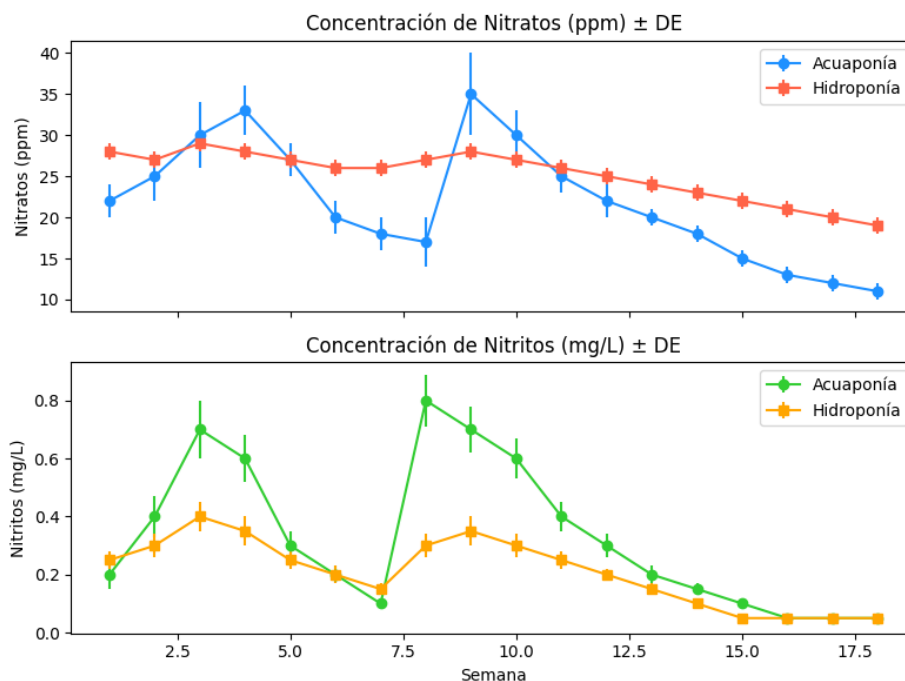


Figura 4. Concentración de nitratos y nitritos en acuaponía e hidroponía durante el experimento.

Sin embargo, la concentración de nitratos en el sistema acuapónico presentó fluctuaciones naturales a lo largo del ciclo, especialmente evidentes en la semana 9, donde se registró un pico de 40 ppm tras la renovación de plantas. Este comportamiento puede atribuirse a la dinámica biológica del biofiltro: cuando se eliminan las plantas maduras, la demanda de nitratos disminuye temporalmente, lo que permite una acumulación transitoria de estos compuestos hasta que las nuevas plántulas comienzan a absorberlos activamente. Además, las bacterias nitrificantes del biofiltro responden lentamente a cambios en la carga de amonio, lo que puede generar picos temporales de nitratos incluso si el sistema está bien equilibrado.

Aunque estas fluctuaciones permanecieron dentro del rango seguro para los peces (menos de 1 mg/L de nitritos), su magnitud sugiere que en futuras implementaciones podría considerarse aumentar la superficie de biofiltro o ajustar la tasa de alimentación durante periodos de renovación de cultivos para minimizar picos de nitratos. Alternativamente, el uso de plantas con mayor capacidad de absorción inicial podría ayudar a mantener la estabilidad nutricional desde el inicio del nuevo ciclo.

Economía circular y sostenibilidad local

Desde una perspectiva ambiental (Tabla 3), el uso de materiales alternativos como los estropajos naturales para fijar las raíces de las plantas contribuyó a reducir en un 40% el uso de plásticos, en comparación con los sistemas hidropónicos que emplean espuma fenólica. Esta sustitución no solo es ecológicamente ventajosa, sino que también representa una oportunidad para incorporar insumos accesibles y biodegradables disponibles en las comunidades rurales (König *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva económica (Tabla 4), el sistema acuapónico mostró un ahorro significativo en costos operativos, con un costo promedio de producción de \$35.8/kg frente a \$58.2/kg en hidroponía y \$55.4/kg en acuacultura. Dado que el sistema hidropónico requiere el ajuste diario de la solución nutritiva (Hydro-Gro®) para recuperar el consumo natural por las plantas, así como la renovación mensual de la solución, su costo operativo es considerablemente más alto debido al uso continuo de fertilizantes sintéticos. En contraste, el sistema acuapónico elimina totalmente este gasto, ya que los nutrientes provienen del metabolismo de los peces.

Tabla 3. Ahorros e impactos ambientales estimados en acuaponía.

Indicador	Acuaponía	Hidroponía	Acuicultura
Ahorro de agua (%)	30%	-	8%
Uso de fertilizantes sintéticos	0%	100%	0%
Ahorro de plásticos (%)	40%	-	-
Costos operativos (\$/kg)	35.8	58.2	55.4

Tabla 4. Inversión inicial, costo operativo y retorno de inversión (ROI).

Indicador	Acuaponía	Hidroponía	Acuicultura
Inversión inicial (MXN)	\$5,340	\$2,220	\$2,600
Costo operativo (\$/kg)	\$35.80	\$58.20	\$55.40
Retorno de inversión (ROI)	12–18 meses	>24 meses	>20 meses
Aplicabilidad en zonas rurales	Alta	Media	Media

*La alta aplicabilidad del sistema acuapónico se debe a su bajo costo operativo, uso de materiales locales y producción dual.

Además, el sistema acuapónico permite la producción simultánea de proteína animal y hortalizas, lo que aumenta el valor agregado del modelo. En 18 semanas, el sistema generó 298.8 kg de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*) y 216 kg de lechuga tipo orejona (*Lactuca sativa*) de acuerdo al Tabla 5, con un rendimiento promedio de 597.6 g por pez y un índice de conversión alimenticia (FCR) de 1.32, lo cual refleja una eficiencia metabólica superior a la acuicultura convencional. En la Comarca Lagunera, el precio de venta de tilapia congelada oscila entre \$100.00 y \$120.00/kg, mientras que la lechuga fresca se vende alrededor de \$25.00/kg. Dado que no existe producción local de tilapia, el sistema acuapónico ofrece una ventaja competitiva importante en el mercado regional.

Aunque el sistema requiere una inversión inicial moderada (aproximadamente \$5,340 por unidad), el análisis de rentabilidad sugiere un retorno de inversión (ROI) estimado de 12 a 18 meses, considerando una producción anual de dos ciclos completos y un costo operativo reducido. El ahorro de agua (30%) y la eliminación de fertilizantes sintéticos contribuyen a reducir los costos recurrentes, lo que mejora la viabilidad a largo plazo. En contextos rurales con acceso limitado a capital, este modelo puede ser especialmente atractivo debido a su bajo costo de mantenimiento y potencial para generar ingresos mediante la venta del excedente productivo.

Por tanto, aunque el sistema acuapónico tiene una inversión inicial mayor que la acuicultura convencional, su menor costo operativo, mayor eficiencia en recursos y capacidad de diversificación

productiva permiten una rentabilidad superior a mediano y largo plazo, lo que lo convierte en una opción estratégica para el desarrollo de sistemas agroalimentarios resilientes en regiones con escasez hídrica y económicos limitados.

La integración del componente vegetal y animal en un sistema simbiótico con bajo consumo de insumos externos convierte a la acuaponía en una alternativa sostenible y viable para contextos con limitaciones hídricas y económicas. A diferencia de otros sistemas productivos tradicionales o intensivos, el modelo acuapónico (Figura 5) validado en este estudio requiere una inversión inicial moderada, pero ofrece beneficios múltiples: producción simultánea de proteína y hortalizas, eficiencia en el uso del agua, y potencial para replicación comunitaria con orientación hacia la autosuficiencia alimentaria.

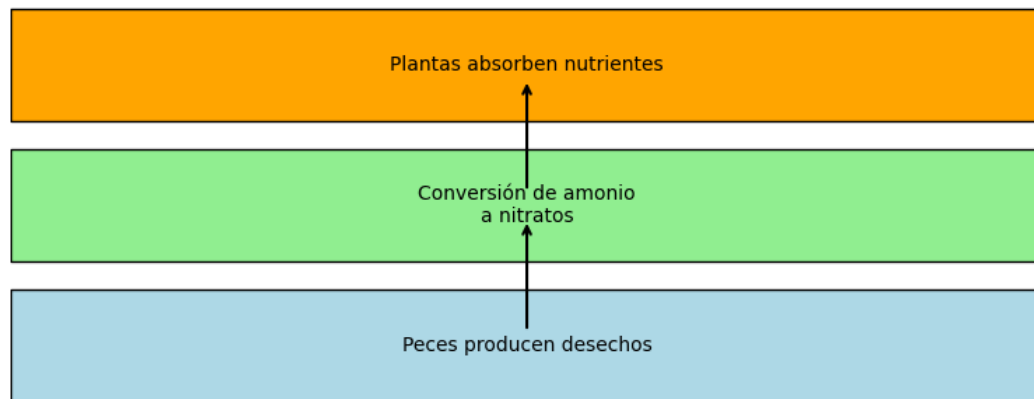
Consideraciones y limitaciones

Aunque los resultados obtenidos fueron favorables en términos técnicos y productivos, es importante considerar ciertas limitaciones. Por ejemplo, el sistema depende del suministro eléctrico constante para operar las bombas de recirculación, lo cual podría representar un reto en comunidades sin acceso seguro a energía. Además, la implementación exitosa del modelo requiere capacitación técnica básica para garantizar el mantenimiento del equilibrio biológico entre peces, plantas y microorganismos. A pesar de estas limitaciones, la escalabilidad y flexibilidad del sistema permiten su adaptación a distintos contextos rurales y climáticos, siempre que se tomen en cuenta las particularidades locales (Lennard, 2022).

Tabla 5. Producción total y precios de mercado por sistema (18 semanas).

Indicador	Acuaponía	Hidroponía	Acuacultura
Tilapia (<i>O. niloticus</i>)	298.8 kg	–	245.8 kg
Lechuga (<i>L. sativa</i>)	216 kg	216 kg	–
Precio de venta (tilapia)	\$100–120/kg	–	\$100–120/kg
Precio de venta (lechuga)	\$25.00/kg	\$25.00/kg	–
Ingresos potenciales anuales*	\$45,480 MXN	\$5,400 MXN	\$29,500 MXN

*Basado en 2 ciclos completos de producción anual.

**Figura 5. Diseño esquemático del modelo acuapónico.**

CONCLUSION

Los resultados confirman que la acuaponía es una alternativa técnica y económicamente viable para regiones semiáridas con escasez hídrica, al integrar producción de proteína animal y hortalizas en un sistema de bajo impacto ambiental. Este modelo no solo mejoró el crecimiento de tilapia y lechuga respecto a sistemas convencionales, sino que también redujo en un 30 % el consumo de agua y eliminó el uso de fertilizantes sintéticos, lo que disminuye costos y riesgos ambientales. La incorporación de materiales locales, como estropajos naturales, y la posibilidad de implementarse en invernaderos rústicos, refuerzan su adaptabilidad a comunidades rurales con recursos limitados.

Funding. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Compliance with ethical standards: All procedures involving fish were conducted in accordance with institutional and national guidelines for the care and

use of aquatic organisms in research. No unnecessary harm or stress was caused to the animals during the experimental process.

Data availability. All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

Author contribution statement (CRediT). **M.G. Cervantes-Vázquez** – Conceptualization, investigation, writing review and editing. **T.J.A. Cervantes-Vázquez** – Investigation, writing original draft. **J.G. Luna-Ortega** – Visualization. **M. Galindo-Guzmán** – Conceptualization, data analysis, visualization. **A.P. Galindo-Guzmán** – Writing review and editing. **A. González-Torres** – Conceptualization, data analysis. **J.L. Ríos-Plaza** – Investigation, experimentation, data analysis, writing review and editing.

REFERENCES

- Baganz, G.F.M., Junge, R., Portella, M.C., Goddek, S., Keesman, K.J., Baganz, D., Lohrberg, F., Staaks, G., Shaw, C. and Kloas, W., 2021. The aquaponic principle—It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 14(1),

- pp.252-264.
<https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B. and Komives, T., 2016. Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, 2(2), pp.17-20.
<https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>
- Comisión Nacional del Agua., 2023. Estadísticas del agua en México 2023. CONAGUA, Ciudad de México. <https://www.conagua.gob.mx>
- Food and Agriculture Organization (FAO)., 2023. The state of world fisheries and aquaculture 2023. Rome: FAO.
<https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía., 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. INEGI, Aguascalientes.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T. and Jijakli, M.H., 2017. Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182.
<https://doi.org/10.3390/w9030182>
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U. and Wuertz, S., 2015. *Aquaponics for the Anthropocene*. In: S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen and G.M. Burnell eds. Aquaponics Food Production Systems. Cham: Springer, pp.515-541.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_21
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M. and Junge, R., 2023. Sustainability assessment of aquaponics. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135599.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135599>
- Lennard, W.A., 2022. Aquaponic system design parameters: what we know and what we don't. *Aquaculture*, 548, 737643.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737643>
- Liu, Y., Rodriguez, Y., Ross, R.L., Zhao, R., Watts, J.A., Grunseich, C., Bruzel, A., Li, D., Burdick, J.T., Prasad, R. and Zheng, L., 2020. RNA abasic sites are prevalent in mammalian and yeast cells and are cleaved by human methylpurine DNA glycosylase. *Nature Communications*, 11, 4012.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17825-4>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. and Lovatelli, A., 2014. *Small scale aquaponic production*. FAO Fisheries Technical Paper 589. Rome: FAO.
<http://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf>
- Timmons, M.B., Guerdat, T. and Vinci, B.J., 2018. *Recirculating Aquaculture*. 4th edn. Ithaca, NY: Ithaca Publishing Company.
- Yogev, U., Sowers, K.R., Mozes, N. and Gross, A., 2021. Nitrogen transformations in aquaponics. *Water Research*, 190, pp.116703.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116703>
- Zou, Y., Zhang, Y. and Hu, Z., 2023. Aquaponics improves growth and resource use efficiency of lettuce. *Science of the Total Environment*, 856(Part 2), pp.159105.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159105>