



Efecto de la biorremediación en la calidad de agua en un sistema acuapónico con carpa koi y lechuga

Effect of bioremediation on water quality in an aquaponic system with koi carp and lettuce

Angie Lorena Aza-Bastidas¹✉, Nayarith Yisela Castro-Pantoja¹✉, Diana Marcela Cuaran-López¹✉
Brayan Alexander Rosero-Obando¹✉, Roberto García-Criollo¹✉, Álvaro Javier Burgos-Arco¹✉, Iván Andrés Sánchez Ortiz¹✉

¹Universidad de Nariño, Colombia.



Vol. 54 (1 y 2) de 2024 | pp: 13 - 22 | ISSN 0562-5351 E-ISSN 2665-6558 | REC.: 3/03/2026- ACEP.: 28/03/2026

RESUMEN

La acuaponía es un sistema que integra la acuicultura y la hidroponía, favoreciendo la reutilización de residuos provenientes de efluentes acuícolas, la producción de alimentos de alta calidad y la reducción del impacto ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la biorremediación del agua a través de un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa*) var. Gourmet y carpa koi (*Cyprinus carpio*), empleando tres tipos de sustratos (turba, grava, cascarilla de arroz) sobre la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados en el sistema acuapónico y el rendimiento del cultivo de lechuga. El experimento se desarrolló en la Granja Experimental Botana (Pasto, Colombia) mediante un sistema de recirculación acuícola instalado en invernadero tipo túnel. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos del agua y la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica (DBO₅ y DQO) y compuestos nitrogenados (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻), así como el rendimiento del cultivo. Los resultados obtenidos evidenciaron que las condiciones fisicoquímicas se mantuvieron dentro de los rangos óptimos durante el periodo experimental. No se presentaron diferencias significativas entre sustratos en la remoción de sólidos, materia orgánica ni compuestos nitrogenados ($p > 0,05$), indicando que la biorremediación estuvo asociada principalmente al biofiltro, y a las condiciones operativas del sistema. En contraste, el rendimiento de lechuga fue significativamente mayor en turba (3,69 kg/m²) y grava (3,63 kg/m²) frente a la cascarilla de arroz (2,53 kg/m²), evidenciando que el sustrato influye en la respuesta productiva de las hortalizas. Se concluye que la acuaponía se consolidó como una alternativa ambientalmente sostenible en la biorremediación del agua y la producción de alimentos con valor agregado.

Palabras clave: sostenibilidad, biorremediación, productividad.

ABSTRACT

Aquaponics is a system that integrates aquaculture and hydroponics, promoting the reuse of waste from aquaculture effluents, the production of high-quality food, and the reduction of environmental impact. The objective of this study was to evaluate the effect of three substrates (peat, gravel, and rice hulls) on the bioremediation of water quality and the yield of curly lettuce (*Lactuca sativa*) within an aquaponic system with koi carp (*Cyprinus carpio*). The experiment was conducted at the Botana Experimental Farm (Pasto, Colombia) using a recirculating aquaculture system installed in a tunnel greenhouse. Physicochemical parameters of the water and the removal efficiency of solids, organic matter (BOD₅ and COD), and nitrogen compounds (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) were monitored, in addition to crop yield. The results obtained showed that the physicochemical conditions remained within optimal ranges during the experimental period. No significant differences were found between substrates in the removal of solids, organic matter, or nitrogen compounds ($p > 0.05$), indicating that bioremediation was primarily associated with the biofilter and the system's operating conditions. In contrast, lettuce yield was significantly higher in peat (3.69 kg/m²) and gravel (3.63 kg/m²) compared to rice hulls (2.53 kg/m²), demonstrating that the substrate influences the productive response of the vegetables. It is concluded that aquaponics has become established as an environmentally sustainable alternative for water bioremediation and the production of value-added foods.

Keywords: sustainability, bioremediation, productivity.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la población mundial ha incrementado la demanda de alimentos inocuos, producidos bajo criterios de sostenibilidad ambiental (FAO 2020). Sin embargo, los sistemas convencionales de producción acuícola y agrícola continúan enfrentando importantes desafíos asociados a la descarga de efluentes hídricos ricos en nutrientes, los cuales pueden generar procesos de eutrofización y acumulación de residuos. A ello se suma el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas, factores que en conjunto inciden en el deterioro de la calidad del agua, la degradación del suelo y la contaminación de los ecosistemas acuáticos (Cuaspa et al., 2019; Ahmad et al. 2022; Cisneros & Nonones 2024).

Ante este panorama, surge la necesidad de implementar tecnologías orientadas a la valorización de dichos residuos, con el fin de mantener el equilibrio biológico de los sistemas productivos y optimizar eficientemente el uso del agua, el espacio, las especies, la energía y otros insumos, asegurando así su viabilidad a largo plazo (López, 2019).

La acuaponía surge como una alternativa innovadora y sostenible que integra la acuicultura con la hidroponía, favoreciendo el aumento de la producción de alimentos inocuos y con valor agregado (Cuaspa et al., 2019). Este modelo promueve la reutilización de los desechos generados por la actividad fisiológica de los peces y del alimento no consumido, los cuales son retenidos mediante filtración mecánica; a su vez, el efluente pasa a un biofiltro en el cual están adheridas las bacterias nitrificantes responsables de la oxidación del NH_4^+ a NO_3^- , para ser aprovechado como fuente de nutrientes por las plantas, posibilitando así la producción simultánea de peces y vegetales (World Renew & Diaconía Nacional, 2020; Effendi et

al., 2016). De esta manera se disminuye el uso del suelo, los recursos hídricos y minerales, minimizando el impacto ambiental.

Por lo anterior, es importante resaltar que la calidad del agua se considera un factor ambientalmente sensible, dado que la acumulación de sólidos y compuestos nitrogenados puede comprometer la salud y el bienestar de los peces, el desarrollo de las plantas y la estabilidad de los consorcios microbianos que sustentan los procesos de biorremediación (Bandi et al., 2016; Yildiz et al., 2017). En consecuencia, el manejo de estos residuos resulta indispensable para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema (Yildiz et al., 2017).

Asimismo, el rendimiento de cultivos hortícolas como la lechuga (*Lactuca sativa*) se constituye como un indicador clave del desempeño ambiental del sistema acuapónico, dado que su crecimiento y productividad dependen directamente de la disponibilidad de nutrientes, la remoción de sólidos y compuestos nitrogenados, así como de las condiciones fisicoquímicas del agua (Bailey & Ferrarezi, 2017; Goddek et al., 2019). Por su parte, la elección de sustratos resulta determinante, ya que materiales como turba, grava o cascarilla de arroz han demostrado propiedades que favorecen el desarrollo de plántulas al aportar porosidad, estabilidad estructural y capacidad de colonización bacteriana (Correal & Rivera, 2023). Dichas características, según Monsalve et al. (2021), convierten a los sustratos en elementos multifuncionales que potencian la nitrificación, facilitan la retención de sólidos y mejoran la disponibilidad de oxígeno, reforzando así la eficiencia integral del sistema acuapónico.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la biorremediación del agua a través de un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa*) var. Gourmet y carpa koi (*Cyprinus carpio*), empleando tres tipos de sustratos (turba, grava, cascarilla de arroz) sobre la eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados en el sistema acuapónico y el rendimiento del cultivo de lechuga.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el municipio de Pasto, en la Granja Experimental Botana, ubicada en el Corregimiento de Catambuco (01° 09' 12" LN y 77° 18' 31" LO), mediante un sistema acuapónico de carpa koi (*Cyprinus carpio*) y lechuga (*Lactuca sativa*), instalado en un invernadero tipo túnel y distribuido en tres módulos productivos que operaron bajo condiciones ambientales y operativas similares. Cada módulo consistió en un sistema de recirculación acuícola (SRA), integrado por un tanque de cultivo con capacidad de 500 L, un sedimentador de alta tasa de 330 L con placas inclinadas a 60°, un biofiltro biológico de 500 L con medio de soporte Kaldnes K1 y un filtro grueso de pulimento de 100 L, provisto de una base circular con malla y

un lecho de grava con granulometría de Ø 1" y ¾". Adicionalmente, el sistema incluyó un sumidero de 250 L equipado con una motobomba sumergible de 0,5 HP, una caja de nivel constante de 80 L y un componente acuapónico.

Previo al ensayo, se inició con un proceso de maduración durante 15 días para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Finalizada esta etapa, se incorporaron 60 peces en cada unidad productiva, para un total de 180 ejemplares, con una densidad de siembra inicial 1,43 kg/m³ y se finalizó con 8,14 kg/m³. Para la siembra de la lechuga cressa se utilizaron 144 plántulas por módulo para un total de 1,440, las cuales fueron germinadas durante un periodo de 15 días. Posteriormente, las hortalizas fueron trasplantadas a vasos plásticos con orificios laterales (1-2 mm con 250 perforaciones por cada vaso) para ser distribuidas en el componente acuapónico. Se implementaron tres tratamientos: turba comercial, grava y cascarilla de arroz quemada, como se observa en la Figura 1.

La evaluación de la remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados se realizó mediante la recolección de muestras de agua en recipientes plásticos de 2 L en diferentes puntos de muestreo del sistema acuapónico que se enlistan en la tabla 1.

Los métodos aplicados para la determinación de cada variable de estudio se describen en la tabla 2.

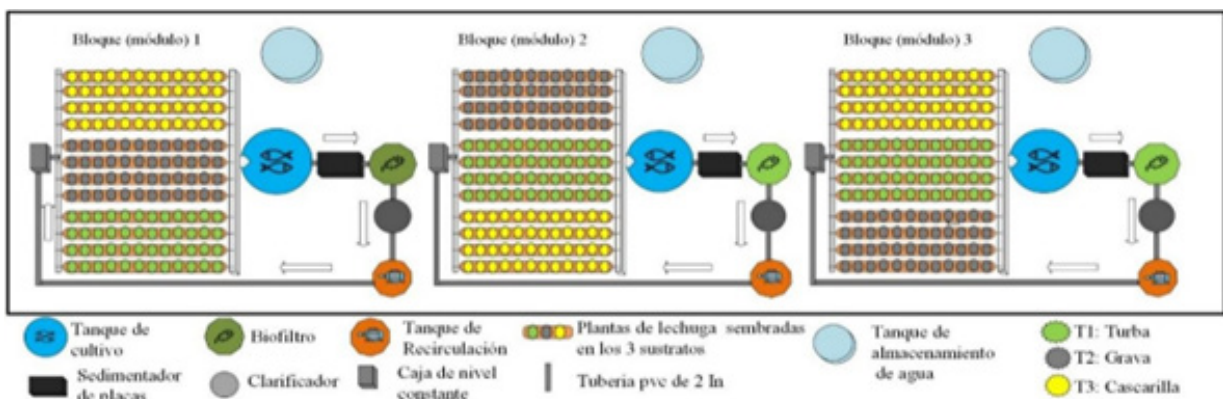


Figura 1. Configuración del sistema y distribución de los tratamientos experimentales.

Tabla 1. Puntos de muestreo para la determinación de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados.

No	Punto de muestreo
P1	Salida de la unidad de cultivo
P2	Salida del sedimentador
P3	Salida del biofiltro
P4	Salida del filtro grueso de pulimento
P5	Salida del sistema agrícola con sustrato turba
P6	Salida del sistema agrícola con sustrato grava
P7	Salida del sistema agrícola con sustrato cascarilla de arroz.
P8	Entrada al sistema agrícola

Tabla 2. Variables de estudio y metodologías aplicadas.

Variable	Unidad	Metodología
Parámetros fisicoquímicos		Los parámetros fisicoquímicos fueron monitoreados en el tanque de cultivo; la temperatura (°C) se registró diariamente y cada 15 días se evaluó el pH, la conductividad eléctrica, así como los sólidos disueltos totales, utilizando un medidor multiparamétrico HANNA HI-9813-6. El oxígeno disuelto (mg/L) se determinó con el equipo Vernier Go Direct®. La alcalinidad y la concentración de dióxido de carbono (CO ₂) se determinaron mediante titulación siguiendo la metodología descrita en el método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (APHA, AWWA & WEF, 2023).
Eficiencia de remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados	%	Se evaluaron siguiendo la metodología del método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (APHA, AWWA & WEF, 2023). Donde: Ci: Concentración de nutriente en afluente, Cf: Concentración de nutriente en efluente
Rendimiento	t/ha	Se tomó el peso de la parte aérea de las 12 plantas efectivas por tratamiento para posteriormente calcular el rendimiento (kg/m ²) dividiendo el peso de las 12 lechugas (kg) entre el área útil de cada tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros fisicoquímicos del agua de cultivo.

En la Tabla 3 se presenta el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos evaluados durante el periodo experimental, los cuales evidenciaron condiciones adecuadas de

calidad del agua. En particular, la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la alcalinidad se mantuvieron dentro de los rangos óptimos reportados en la literatura, favoreciendo el equilibrio químico del agua y el adecuado desarrollo de los procesos implicados con la transformación de los compuestos nitrogenados (Summerfelt et al., 2015).

Según Goddek et al. (2019) y Reyes et al. (2020), la estabilidad de estos parámetros es fundamental para reducir el estrés en los organismos acuáticos y mantener condiciones que garanticen su bienestar durante el ciclo productivo. Asimismo, estas condiciones resultan consistentes con lo reportado por Yildiz et al. (2017), quienes destacan la importancia del control fisicoquímico del agua para sostener el desempeño conjunto de peces y plantas en sistemas acuapónicos. Adicionalmente, los valores de alcalinidad y conductividad eléctrica estuvieron dentro de los rangos recomendados, contribuyendo a la estabilidad química del sistema y al mantenimiento del balance osmótico de los peces, así como a una adecuada

disponibilidad iónica en el componente acuapónico (Wortman, 2015; Vaca, 2023). En términos generales, los parámetros analizados permitieron un funcionamiento estable y controlado del sistema. De acuerdo con otros autores, el NH_4^+ , el NO_2^- y el NO_3^- se encontraron dentro del rango permisible para la especie, aspecto coherente con el punto de muestreo de toma de datos que fue en el tanque de cultivo, donde la carga de compuestos nitrogenados suele ser menor (Benavides & Daza, 2020), debido a que en este lugar el aprovechamiento de sustancias nutritivas para plantas y animales es mayor que la excreción de metabolitos de cada uno de los organismos.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos en los tanques de cultivo.

Parámetros	Unidades	M1	M2	M3
pH		7,16 ± 0,27	7,00 ± 0,20	7,12 ± 0,16
Temperatura	°C	23,99 ± 0,60	24,17 ± 0,73	23,57 ± 0,58
OD	mg/L	5,93 ± 0,11	5,90 ± 0,11	5,90 ± 0,09
CO ₂	mg/L	8,80 ± 1,39	6,34 ± 1,15	7,04 ± 0,88
DBO ₅	mg/L	5,90 ± 1,26	5,23 ± 1,48	5,53 ± 1,33
DQO	mg/L	36,80 ± 7,85	29,80 ± 9,12	32,00 ± 8,46
Alcalinidad	mg/L	102,40 ± 12,36	92,40 ± 6,84	96,00 ± 7,62
CE	µS/cm	150,98 ± 20,14	158,58 ± 17,19	152,06 ± 24,83
NH ₄ ⁺	mg/L	1,43 ± 1,41	1,18 ± 1,08	1,39 ± 1,56
NO ₂ ⁻	mg/L	0,05 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,02
NO ₃ ⁻	mg/L	3,04 ± 1,97	3,70 ± 2,61	3,34 ± 2,09

Donde: M1 = Módulo 1; M2 = Módulo 2 y M3 = Módulo 3; C.E = Conductividad eléctrica.

Eficiencias de remoción

La Tabla 4 presenta los resultados de la eficiencia de remoción de sólidos y materia orgánica dentro del sistema acuapónico, en los cuales no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para ST, que oscilaron entre 20,18 % y 21,81%; al respecto, Duarte y Gómez (2019) reportan eficiencias más bajas que estuvieron entre 2,11 y 2,96% trabajando en un sistema con tilapia y lechuga, con los mismos sustratos. Respecto a los sólidos

disueltos, los valores encontrados fluctuaron entre 2,15 y 10,71 %; en cuanto a los sólidos suspendidos, sus valores se ubicaron entre 25,06 y 44,93 %; no existiendo diferencias significativas para estas variables dentro del sistema acuapónico. A diferencia de lo reportado por Duarte y Gómez (2019), quienes en iguales condiciones obtuvieron valores superiores para sólidos suspendidos que estuvieron entre 27,07 y 28,40 %, diferencias que podrían atribuirse a variaciones en el diseño del sistema y en el manejo hidráulico.

En cuanto a la materia orgánica, los valores encontrados para DQO oscilaron entre 44,83 y 51,68% y para DBO₅ entre 60,08 y 66,30%, lo que permite inferir que posiblemente la carga orgánica presente en el sistema fue predominantemente biodegradable, lo que favoreció la actividad microbiana y la mineralización de nutrientes.

Si bien la literatura disponible evidencia que este aspecto ha sido poco estudiado en sistemas acuapónicos, lo que limita la

posibilidad de establecer comparaciones directas. No obstante, Rodríguez (2016) señala que una elevada carga orgánica reduce la eficiencia en la mineralización de nutrientes y limita la oxigenación en las raíces de las plantas; considerando la configuración implementada, estos efectos fueron mitigados, ya que probablemente se favoreció una adecuada disponibilidad de nutrientes y se permitió una asimilación efectiva por parte de las plantas, sin evidencias de deficiencias ni acumulación excesiva en solución.

Tabla 4. Eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos

Tratamiento	DQO (%)	DBO ₅ (%)	ST (%)	SS (%)	SD (%)
T ₁ (Turba)	51,68 ± 9,77	66,30 ± 10,32	21,81 ± 18,74	28,40 ± 22,94	16,26 ± 1,78
T ₂ (Grava)	47,69 ± 10,29	63,14 ± 10,00	21,01 ± 18,64	27,98 ± 22,18	15,35 ± 2,52
T ₃ (Cascarilla de arroz)	44,83 ± 10,80	60,08 ± 9,97	20,18 ± 18,55	27,07 ± 21,57	14,88 ± 2,56

No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables evaluadas ($p > 0,05$). ST: sólidos totales, SS: sólidos suspendidos, SD: sólidos disueltos.

La Tabla 5 muestra las eficiencias obtenidas en la remoción de compuestos nitrogenados dentro del sistema acuapónico. Los valores para NH₄⁺ oscilaron entre 28,83 y 32,69%, variable que no presentó diferencias significativas entre los tratamientos; respecto a estos valores, Jaramillo y Ramos (2018) registraron porcentajes del 45%, inferiores a los valores encontrados en la presente investigación. En ese sentido, Alam et al. (2020) indicaron valores de 28–40 % para sustratos como la cascarilla de arroz. Estas diferencias posiblemente se pueden atribuir a la actividad microbiana en el biofiltro, que cumple un rol predominante en la oxidación del NH₄⁺, mientras que los sustratos actúan como medios de adhesión biológica.

Respecto a la remoción de NO₂⁻ variaron entre 23,45 y 26,20%, indicando un comportamiento homogéneo entre los tratamientos, sin

diferencias significativas. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos reportados por Jaramillo y Ramos (2018) y Oladimeji et al. (2020), quienes señalan variaciones entre 18 % y 39 % según el tipo de sustrato y la configuración del sistema acuapónico. De manera concordante con los resultados del presente estudio, Hamid et al. (2022) señalan eficiencias cercanas al 22 % para sustratos de grava.

En relación con los NO₃⁻ se obtuvieron valores de 22,63 y 25,64%, sin evidenciarse variaciones significativas entre los tratamientos. Estos resultados son comparables con los reportados por Jaramillo y Ramos (2018) presentando valores próximos al 25 % en sistemas acuapónicos con tilapia roja y lechuga. Por su parte, Oladimeji et al. (2020) señalaron porcentajes entre 28 y 29 % al emplear sustratos orgánicos a base de cascarilla y Hamid et al. (2022) registraron cifras ligeramente superiores, próximas al 30 %, diferencias probablemente atribuidas a

la tasa de absorción vegetal, la densidad de siembra y el balance entre la producción de NO_3^- por nitrificación y su consumo por las plantas.

El comportamiento similar observado en los tres sustratos indica un proceso de nitrificación estable favorecido por niveles adecuados

de oxígeno disuelto y pH, lo cual limita la acumulación de NO_2^- y confirma la actividad de las bacterias nitrificantes. De este modo, la eficiencia no depende exclusivamente del material utilizado, sino de factores operativos como el tiempo de retención hidráulico, la aireación y la carga de contaminante.

Tabla 5. Eficiencia de remoción (%) de compuestos nitrogenados en los tratamientos.

Tratamiento	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-
T ₁ (Turba)	31,39 ± 5,31	26,20 ± 8,93	25,64 ± 9,60
T ₂ (Grava)	32,69 ± 5,34	26,07 ± 8,67	24,92 ± 10,63
T ₃ (Cascarilla de arroz)	28,83 ± 6,30	23,45 ± 8,03	22,63 ± 8,78

En relación con la variable rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. gourmet, se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tabla 6), presentando los mayores valores promedio los sustratos turba (3,69 kg/m²) y grava (3,63 kg/m²), valores que escalados a hectárea equivalen a 36,9 y 36,3 t/ha de lechuga crespa, respectivamente, mientras que la cascarilla de arroz registró el rendimiento más bajo (2,53 kg/m² equivalente a 25,3 t/ha), presentando diferencias estadísticas significativas respecto a los dos sustratos anteriores.

Estos resultados de rendimiento de lechuga posiblemente se pueden atribuir a las características que presentan la turba y la grava, que favorecieron la retención y liberación gradual de nutrientes en el sistema acuapónico, aumentando la disponibilidad de NO_3^- en el agua y facilitando su absorción por las plantas. Al respecto, López y Frezza (2022) resaltan la importancia de la absorción de nitrógeno en estos sistemas acuapónicos que oscilan entre 1 y 2,5 kg/ha. N por tonelada de materia seca producida.

En términos comparativos, los rendimientos obtenidos superan los valores promedio reportados para métodos tradicionales de cultivo a nivel nacional y regional (Nariño), estimados en 1,83 y 2,4 kg/m², respectivamente

(Ortiz, 2023). Asimismo, estos resultados son superiores a los informados por Petersen (2008) en sistemas acuapónicos (2 kg/m²), aunque inferiores a los reportados por Rodríguez et al. (2022), quienes alcanzaron hasta 4,75 kg/m² en la misma variedad bajo condiciones acuapónicas. Por su parte, Villa et al. (2018) reportan en hidroponía pesos promedio por planta cercanos a 487 g y rendimientos de 24.333 kg/m², mientras que en el suelo se obtienen pesos inferiores (420–450 g por planta) y valores alrededor de 6.900 kg/m²; resultados cercanos han sido descritos por Cruz (2016). Lo que demuestra que estos sistemas de producción en acuaponía son alternativa eficiente no solo en términos de productividad, sino también de tiempo, ya que los ciclos del cultivo pueden pasar de 60 días en campo abierto a 45 días en situaciones de sistemas de recirculación.

Valores con literales distintos en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 6. Rendimiento de la lechuga en los tratamientos del sistema acuapónico.

Tratamiento	Rendimiento (kg/m ²)
T ₁ (Turba)	3,69 a
T ₂ (Grava)	3,63 a
T ₃ (Cascarilla de arroz)	2,53 b

CONCLUSIONES

Los tres sustratos (turba, grava, cascarilla) en sistema acuapónico fueron eficientes y mostraron un comportamiento similar frente a la remoción de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados.

El rendimiento obtenido en el cultivo de lechuga bajo el sistema acuapónico mostró que los sustratos de turba y grava superaron los promedios nacionales para sistemas de producción acuapónicos.

Los resultados de la presente investigación evidenciaron que el sistema acuapónico fue muy eficiente en términos de la biorremediación de la calidad del agua, respecto a la eficiencia de transformación de la carga de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados, garantizando la calidad hídrica dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de peces y plantas.

AGRADECIMIENTO

A la Vicerrectoría de Investigación e Interacción Social de la Universidad de Nariño por el apoyo institucional y la financiación otorgada para la ejecución de la investigación en el marco de la convocatoria Docente 2020. Al programa de Ingeniería en Producción Acuícola y a la Granja Experimental Botana, por facilitar las instalaciones e infraestructura para la realización del trabajo de campo.

REFERENCIAS

AHMAD, A., CHIN, J., HARUN, M., & LOW, S. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *J Water Process Eng*, 46, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>

ALAM, H., OTHMAN, I., SAMSUDIN, S., JOHARI, A., HASSIM, H., & KAMARUDDIN, M. (2020). Carbonized rice husk and cocopeat as alternative media bed for aquaponic system. *Sains Malaysiana*, 49(3), 483 - 492. <https://doi.org/10.17576/jsm-2020-4903-03>

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), & WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (W. Lipps, E. Braun y T. Baxter, Eds.; 24.^a ed.).

BAILEY, D., & FERRAREZI, R. (2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI Commercial Aquaponic System. *Aquacul Rep*, 7, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>

BANDI, A., CRISTEA, V., DEDIU, L., PETREA, S., CRETU, M., RAHOVEANU, A., ZUGRAVU, A., TUREK, M., MOCUTA, D & SOARE, I. (2016). The Review of Existing and In-Progress Technologies of the Different Subsystems Required for the Structural and Functional Elements of the Model of Multi-Purpose Aquaponic Production System. *Rom Biotechnol Lett*, 21(4), 11621-11631. https://www.researchgate.net/profile/Mirela-Cretu/publication/308916750_1_1/links/57f7579508ae91deaa604427/1-1.pdf

BENAVIDES, C., & DAZA, Y. (2020). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en agua de un sistema acuapónico para la producción de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), fresa (*Fragaria vesca*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) (Trabajo de grado, Fundación Universitaria de Popayán). <https://fupvirtual.edu.co/repositorio/s/repositorio/item/11348>

- CISNEROS, G., & NONONES, N. (2024). Impact of the use of fertilizers on agricultural soils: A systematic review of scientific literature. En Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.391>
- CORREAL, S., & RIVERA, J. (2023). Evaluación de la eficiencia de sustratos orgánicos alternativos como sustitutos de la turba en la plantulación de tomate (trabajo de grado) Universidad Santo Tomás. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/bitstreams/4f02f1f1-ef0e-46e0-994b-40e1c00730ff/download>
- CRUZ, A. (2016). Evaluación de tres variedades del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos sistemas de hidroponía bajo ambiente semi controlado en el centro experimental chocloca. Ventana Científica, 7 (12), 31-42. <https://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ventana-cientifica/article/view/2>
- CUASPA, J., GUERRERO, D., & BURGOS, A. (2019). Sistemas acuapónicos como alternativa sustentable en la acuicultura. Revista de investigación Pecuaria, 6 (1), 95-103. <https://doi.org/10.22267/revip.1961.9>
- DUARTE, D., & GÓMEZ, Á. (2019). Evaluación del porcentaje de remoción de sólidos de un sistema acuapónico de tilapia roja (*Oreochromis* sp) y lechuga (*Lactuca sativa*) con tres diferentes sustratos en la Granja Experimental Botana, municipio de Pasto (trabajo de grado) Universidad de Nariño. Repositorio Institucional. <https://sired.udenar.edu.co/15493/1/93176.pdf>
- EFFENDI, H., WAHYUNINGSIH, S., & WARDIATNO, Y. (2016). The use of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) in water recirculation system. *Appl Water Sci*, 7(6), 3055-3063. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0418-zHU>
- GODDEK, S., JOYCE, A., KOTZEN, B., & BURNELL, G. (2019). Aquaponics Food Production Systems. Springer Open. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- HAMID, S., LANANAN, F., MOHD. N., & ENDUT, A. (2022). Physical filtration of nutrients utilizing gravel-based and lightweight expanded clay aggregate (LECA) as growing media in aquaponic recirculation systems (ARS). *Aquac Eng*, 98, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102261>
- JARAMILLO, M., & RAMOS, E. (2018). Evaluación de la remoción de compuestos nitrogenados de un sistema acuapónico compuesto por tilapia y lechuga utilizando tres tipos de sustratos (turba comercial, grava y cascarilla de arroz) bajo condiciones de invernadero en la Granja Experimental Botana, municipio de Pasto (trabajo de grado) Universidad de Nariño.
- LÓPEZ, J. (2019). Cultivo acuapónico aquaponic culture - tool kit guía especializada. Aula del mar. <https://cifalmalaga.org/publicacion/cultivo-acuoponico-guia-especializada/>
- MONSALVE, O., HENAO, M., & GUTIÉRREZ, J. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), 1–23. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1977

- OLADIMEJI, A. S., OLUFEAGBA, S. O., AYUBA, V. O., SOLOMON, S. G., & OKOMODA, V. T. (2020). Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish–pumpkin aquaponics system [Efectos de diferentes medios de crecimiento sobre la calidad del agua y el rendimiento vegetal en un sistema acuapónico de bagre y calabaza]. *J. King Saud Univ. Sci.*, 32(1), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.06.003>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020: La sostenibilidad en acción*. FAO. <https://www.fao.org/3/ca9229es/ca9229es.pdf>
- REYES, A., MARTÍNEZ, P., & AHMAD, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *J Cleaner Prod*, 263, 121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- RODRÍGUEZ, O. (2016). Diseño e implementación de un microsistema de cultivo acuapónico automatizado (trabajo de grado) Universidad de los Llanos. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unillanos.edu.co/entities/publication/a6c48e67-d176-4aa0-b67d-05106436a74d>
- SHETE, A., VERMA, A., CHADHA, N., PRAKASH, C., CHANDRAKANT, M., & NUWANSI, K. (2017). Evaluation of different hydroponic media for mint (*Mentha arvensis*) with common carp (*Cyprinus carpio*) juveniles in an aquaponic system. *Aquaculture International*, 25(3), 1291–1301. <https://doi.org/10.1007/s10499-017-0114-5>
- SUMMERFELT, S., ZÜHLKE, A., KOLAREVIC, J., REITEN, B., SELSET, R., GUTIERREZ, X., & TERJESEN, B. (2015). Effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and system pH in semi-commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors. *Aquacult Eng*, 65, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.11.002>
- VACA, S. (2023). Automatización, modelamiento y evaluación de un sistema acuapónico NFT para cultivo de Carpa Roja (*Cyprinus carpio*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*) (tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83734>
- VILLA, G., GIRALDO, B., ORREGO, M., DÍAZ, L., JARAMILLO, B., & GARCÍA, H. (2018). Evaluación comparativa de lechuga (*Lactuca sativa* L.) “Verónica” bajo condiciones controladas en dos métodos de producción. *Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño*, 4(1), 36–46. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2055>
- WORLD RENEW & DIACONIA NACIONAL (2020). Manual Técnico de Acuaponía experiencias en manejo de sistemas acuapónicos con enfoque de seguridad alimentaria. <https://es.scribd.com/document/721951031/Manual-Tecnico-de-Acuaponia>
- WORTMAN, S. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Sci Hortic*, 194, 34–42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423815301199>
- YILDIZ, H., ROBAINA, L., PIRHONEN, J., MENTE, E., DOMÍNGUEZ, D., & PARISI, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces – A review. *Water*, 9(1), Article 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>