



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Fitorremediación de amoníaco mediante macrófitas nativas en un sistema acuapónico para el cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*) bajo diferentes densidades de siembra

Phytoremediation of ammonia using native macrophytes in an aquaponic system for tilapia (*Oreochromis spp.*) farming under different stocking densities

Nelson René Cervantes-Forero^{1,3}, Edith González-Afanador^{2,4}

1 Universidad de La Salle, Chapinero Campus

2 Universidad Nacional de Colombia

3  <https://orcid.org/0000-0003-3671-7188>

4  <https://orcid.org/0000-0001-8701-3653>

RESUMEN

Este estudio se desarrolló en el marco de la optimización y validación de un prototipo acuapónico de escala comercial (208 m³), basado en la fitorremediación con macrófitas nativas, como alternativa sostenible para el manejo de compuestos nitrogenados en piscicultura intensiva, con potencial aplicación en comunidades vulnerables. El objetivo fue evaluar la eficiencia del sistema para reducir el nitrógeno amoniacal en el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) bajo tres densidades de siembra (18, 27 y 55 peces/m³). El experimento se desarrolló durante ocho semanas bajo un diseño secuencial. Dada la naturaleza del prototipo y la ausencia de réplicas independientes simultáneas, el análisis se basó en la descripción de tendencias en los parámetros de calidad del agua (pH, OD, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N), comparando el afluente (tanques

DOI: <https://doi.org/10.66778/RM.v09n01.06>

Enviado: 29 de enero de 2026

Aceptado: 12 de febrero de 2026

Palabras clave: Amoníaco, fitorremediación, macrófitas, nitrificación, *Oreochromis spp.*

Keywords: ammonia, nitrification, phytoremediation, *Oreochromis spp.* water quality.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

piscícolas y sedimentador) con el efluente tratado (tanque recolector). Los resultados mostraron una reducción efectiva del amoníaco, concentraciones bajas y estables de nitritos (< 0.06 mg/L) y una acumulación progresiva de nitratos, lo que indica una nitrificación activa. A pesar de un pH de aproximadamente 5.5 (una condición teóricamente limitante), la interacción entre las raíces de las plantas y las bacterias epífitas en la rizósfera permitió un tratamiento eficiente. La principal limitación observada fue la disminución del oxígeno disuelto en las densidades más altas, lo que sugiere la necesidad de optimizar la aireación para futuros escalamientos. En conjunto, los resultados validan el uso de plantas acuáticas nativas como biofiltros funcionales en acuaponía, destacando su capacidad para mantener la calidad del agua bajo cargas medias-altas y su aplicabilidad en contextos con recursos limitados.

ABSTRACT

This study was conducted within the framework of the optimization and validation of a commercial-scale aquaponic prototype (208 m³), based on phytoremediation processes using native aquatic macrophytes as a sustainable alternative for managing nitrogenous compounds in intensive aquaculture, with potential application in vulnerable communities. The objective was to evaluate the efficiency of the system in reducing ammoniacal nitrogen in the culture of red tilapia (*Oreochromis spp.*) under three stocking densities (18, 27, and 55 fish/m³). The experiment was carried out over eight weeks, during which water quality parameters including pH, dissolved oxygen (DO), NH₃-N, NO₂-N, and NO₃-N were monitored, comparing the system influent (fish tanks and sedimentation unit) with the treated effluent collected in a plant-associated reservoir. The results showed an effective reduction in ammonia, consistently low nitrite concentrations (< 0.06 mg/L), and a progressive accumulation of nitrates, indicating an active and functional nitrification process. Although system pH remained around 5.5—a condition considered limiting for conventional nitrification—the interaction between aquatic plant roots and epiphytic bacterial communities in the rhizosphere enabled efficient nitrogen treatment. As the main limitation, a decrease in dissolved oxygen was observed at higher stocking densities, highlighting the need to optimize aeration systems for future scaling processes. Overall, the results validate the use of native aquatic plants as functional components in aquaponic systems, demonstrating their capacity to maintain water quality under medium-to-high loading conditions and their applicability in resource-limited production contexts.

INTRODUCCIÓN

El amoníaco es un compuesto tóxico para la mayoría de los seres vivos, incluidas las plantas acuáticas. Sin embargo, muchas de estas plantas son capaces de utilizarlo directamente como fuente de nitrógeno disuelto en el agua, lo que les permite prescindir, a diferencia de las plantas terrestres, del proceso de nitrificación bacteriana para asimilar el nitrógeno en forma de nitrato (Wang et al., 2019).

El manejo eficiente de los compuestos nitrogenados, en particular del amoníaco tóxico (NH₃), constituye uno de los principales desafíos en los sistemas de acuicultura intensiva y recirculante. En respuesta a esta problemática, la acuaponía emerge como un sistema integrado y sostenible que combina la producción piscícola con el cultivo de plantas, aprovechando los desechos de los peces como nutrientes para las plantas, que a su vez depuran el agua (Zimmermann et al., 2023). No obstante, la gran mayoría de los sistemas acuapónicos convencionales están diseñados alrededor de plantas terrestres, las cuales requieren que el nitrógeno sea previamente transformado en nitrato (NO₃⁻) mediante el proceso bacteriano de nitrificación (Camargo-Castellanos et al., 2022).

En este contexto, las macrófitas presentan un potencial significativo y menos explorado para la fitorremediación directa en sistemas acuapónicos. A diferencia de las plantas terrestres, muchas especies de plantas acuáticas poseen la capacidad fisiológica de absorber y asimilar directamente el amonio (NH₄⁺) disuelto en el agua, prescindiendo en gran medida de la nitrificación previa (Wang et al., 2019). Este proceso, denominado fitofiltración o fitodegradación, implica la adsorción de iones en la superficie de las raíces y su posterior absorción e incorporación al metabolismo vegetal a través de la ruta de la glutamina sintetasa (Gao et al., 2016), fijando el nitrógeno en tejidos vegetales.

Además de esta asimilación directa, las macrófitas ejercen un papel crucial en la rizodegradación. Su sistema radicular actúa como un biofiltro rizosférico dinámico: las raíces liberan oxígeno hacia la rizósfera a través de tejidos especializados como el aerénquima, creando microzonas aeróbicas que favorecen la actividad de bacterias nitrificantes (e.g., *Nitrosomonas* spp.) que oxidan el amonio a nitrato (Zhou et al., 2017). Paralelamente, los exudados orgánicos de las raíces proporcionan carbono a las comunidades microbianas, estimulando su desarrollo. De manera complementaria,

la misma arquitectura radicular puede generar microambientes anóxicos que promueven la desnitrificación bacteriana, transformando el nitrato en gases nitrogenados (N_2 , N_2O) y removiendo así el nitrógeno del sistema de forma definitiva del agua (Vymazal, 2007; Yi et al., 2014). Esta capacidad dual de las macrófitas para crear condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas en su entorno radicular es fundamental para lograr un ciclo de nitrógeno completo y eficiente.

A pesar de este potencial, existe escasa información científica sobre la implementación práctica de macrófitas acuáticas como biofiltro principal en sistemas acuapónicos o de recirculación acuícola (RAS) (Camargo-Castellanos et al., 2022; Mandal & Bera, 2024; Oktaviyani et al., 2024), por lo que la fitorremediación con estas plantas sigue siendo considerada una tecnología en desarrollo (Kafle et al., 2022).

Este estudio tuvo como objetivo evaluar un prototipo de sistema acuapónico que integra diversas macrófitas acuáticas como biofiltro central, con el fin de determinar su capacidad para fitorremediar amoníaco en cultivos de tilapia (*Oreochromis spp.*) bajo diferentes densidades de siembra. El trabajo busca contribuir al desarrollo de alternativas de bajo costo y alta eficiencia para el manejo sostenible de la calidad del agua en acuicultura. Para ello, se propone la inclusión de múltiples especies de macrófitas, ya que, como señala Vymazal (2007), la combinación de diferentes especies potencia la fitorremediación gracias a la complementariedad funcional.

METODOLOGÍA

El sistema acuapónico de 204 m² se construyó dentro de la Institución Educativa Concentración de Desarrollo Rural, municipio de Saravena, Colombia (coordenadas N 6° 57' 11.983", O 71° 53' 4.751"). El sistema incluye tanques de biofiltrado adaptados para el establecimiento y crecimiento de plantas acuáticas nativas, con el fin de evaluar su capacidad de fitorremediación de compuestos nitrogenados derivados de las excretas de *Oreochromis spp.* (tilapia) en etapa juvenil, en sinergia con las bacterias nitrificantes epífitas en su sistema radicular. El sistema está compuesto por los siguientes elementos (Figuras 1 y 2):

Dos tanques australianos de geomembrana (18 m³ cada uno) para el cultivo piscícola, ubicados bajo cubierta para evitar la radiación solar directa y el crecimiento de algas.

Un tanque sedimentador (2 m³) para la decantación del afluente proveniente de los estanques piscícolas. En este tanque se establecieron ejemplares de *Eichhornia crassipes*, cuyas raíces complementaron la función de sedimentación al actuar como filtro de sólidos suspendidos

Seis tanques de biorremediación (1 m³ cada uno), configurados como humedales artificiales, para el desarrollo de plantas acuáticas (*Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, *Azolla sp.*, *Lemna sp.*, *Salvinia sp.* y *Limnobium laevigatum*), organismos clave en la fitorremediación del amoníaco en conjunto con las bacterias epífitas asociadas a sus sistemas radiculares.

Figura 1

Esquema del prototipo del sistema acuapónico

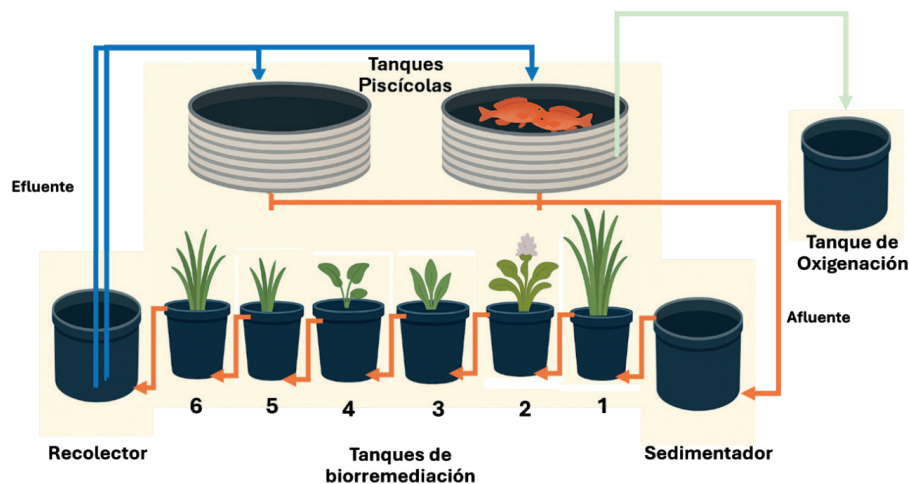


Figura 2

Fotografía del sistema acuapónico y posicionamiento del sistema de biofiltrado



Un tanque recolector (2 m³) equipado con una bomba anfibia que recircula el efluente tratado hacia el tanque piscícola, cerrando el ciclo hidráulico

Sistema de oxigenación

La oxigenación del agua en los tanques piscícolas se logró mediante un sistema de desgasificación por caída vertical en un tanque independiente. Durante la caída de 5 metros, el agua experimentaba múltiples impactos que favorecían la liberación de gases nocivos y su reemplazo por oxígeno atmosférico. El sistema era alimentado por una bomba anfibia de 420 W de potencia, con un caudal de 180,000 L/h y una altura máxima de 6.5 m, logrando una concentración de oxígeno disuelto de 7.8 mg/L.

Posteriormente, el agua oxigenada se distribuía desde este tanque de oxigenación hacia los estanques de peces mediante dos bombas anfibia adicionales, cada una con una potencia de 150 W, garantizando así un retorno eficiente y controlado al sistema de cultivo.

El módulo de biofiltrado (tanques de macrófitas) no contó con aireación suplementaria. Esta decisión se tomó con un doble propósito: (1) reducir los

costos energéticos del sistema, y (2) minimizar la turbulencia del agua, ya que se ha reportado que esta puede reducir la captación de nutrientes por parte de las macrófitas (Ellawala et al., 2012). Asimismo, no se utilizaron lechos o sustratos artificiales para la formación de *biofilm*, aprovechando en su lugar la versatilidad y alta superficie de contacto del sistema radicular de las plantas acuáticas como soporte natural para la colonización natural de bacterias epífitas.

Energía

El suministro de energía para el funcionamiento de los equipos fue eléctrico, registrando un consumo diario estimado de 17.07 kWh/día. El mayor consumidor (Tabla 1) correspondió a la bomba anfibia Sunsun JAP-18000, la cual representó aproximadamente el 57.8% del consumo total diario (9.87 kWh de 17.07 kWh). El consumo eléctrico total estimado durante un período de operación continua de 60 días para cada experimento sería de alrededor de 1024.2 kWh.

Implementación experimental

Se construyó y evaluó un prototipo a escala real para determinar su capacidad de biorremediación del amoníaco en cultivos de tilapia híbrida *Oreochromis spp.* bajo tres densidades de siembra: 18, 27 y 55 peces por metro cúbico. La evaluación se realizó durante los dos primeros meses de desarrollo de los juveniles.

Protocolo de monitoreo ambiental

Se realizaron análisis semanales de calidad de agua durante el periodo experimental para cada densidad. Las variables medidas el tanque piscícola, en el afluente (tanque sedimentador) y en el efluente tratado (tanque recolector) incluyeron: Parámetros físico-químicos: Temperatura (°C) y pH. Parámetros de calidad de agua: Oxígeno disuelto con el medidor MW600 de la marca Milwaukee, amoníaco, nitratos y fosfatos (mg/L) y nitritos (µg /L) medidos con el Fotómetro Multiparámetro con pHmetro HI 83300-

Tabla 1

Equipos utilizados

Equipo	Modelo y Marca	Consumo W	Uso diario (h día)	Consumo diario (kWh/día)
Bomba anfibia	Sunsun JAP-18000	420	23.5	9.87
Bomba anfibia	Evans Aqua 60W	60	2.5	0.15
2 Bombas anfibia	Evans Aqua 150W	150 (c/u)	23.5	7.05 (total ambas)

01. Las muestras se tomaron de manera sistemática en los tanques piscícolas, sedimentador y recolector.

Preparación y secuencia experimental

El estudio se condujo de forma progresiva, evaluando secuencialmente las densidades de siembra de menor a mayor. Entre cada fase experimental, el sistema se preparó de la siguiente manera:

Limpieza del sistema: Desinfección del tanque piscícola con hipoclorito de sodio a una concentración de 200 mg/L durante 30 minutos (Francis-Floyd, 2001), para posteriormente ser retirado mediante enjuague con agua potable y eliminado por sifonado. Los tanques de biofiltrado no se desinfectaron para conservar la población de bacterias nitrificantes (Bakke et al., 2017; Blancheton et al., 2013; Department of Primary Industries, 2008).

Reacondicionamiento: Los tanques se rellenaron con agua del acueducto municipal. Tras un periodo de degasificación del cloro, se activó la recirculación en el sistema de biofiltrado para homogeneizar el agua y restablecer el equilibrio microbiológico antes de iniciar la siguiente densidad de siembra.

Análisis de datos

El estudio se basó en un diseño cuasi-experimental descriptivo de tipo antes-después, evaluando secuencialmente tres niveles de densidad de siembra (18, 27 y 55 peces/m³). Dada la configuración del prototipo a escala real y la ausencia de réplicas biológicas independientes por tratamiento, no se realizaron comparaciones estadísticas inferenciales (ej., ANOVA, tests de comparación de medias)

entre densidades. Por consiguiente, no se reportan valores de *p* ni niveles de significancia estadística. El análisis se centró en la descripción y visualización de las tendencias temporales de los parámetros de calidad del agua (oxígeno disuelto, amoníaco, nitrito, nitrato, fosfato, temperatura y pH) dentro de cada fase experimental. Para ello, los datos fueron organizados, depurados y graficados utilizando el software RStudio (versión 9.2, R Core Team, 2025), con el fin de ilustrar de manera clara la dinámica de cada variable en los diferentes puntos de muestreo (tanque piscícola, sedimentador y recolector).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de los compuestos nitrogenados

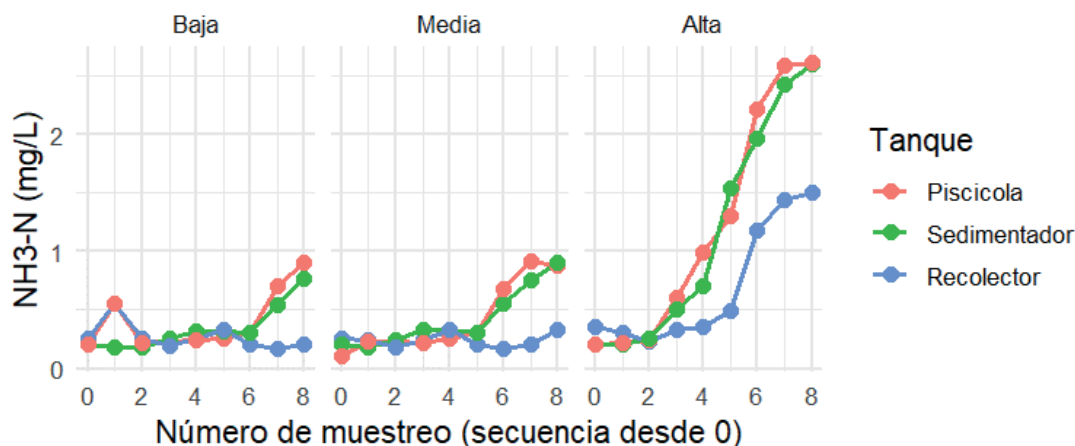
Amoniaco/Amonio ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$)

En los tres niveles de densidad evaluados, la concentración de nitrógeno amoniacal total ($\text{NH}_3\text{-N}$) mostró una tendencia creciente a lo largo del tiempo, siendo más pronunciada en el tratamiento de densidad alta (Figura 3). Este incremento se atribuye a la mayor carga orgánica derivada de las excretas de los peces. Sin embargo, el sistema mantuvo un pH estable ligeramente ácido (≈ 5.5) durante todo el experimento. La toxicidad aguda del amoníaco no ionizado (NH_3) para los peces es ampliamente reconocida, y su fracción en el agua está dictada principalmente por el pH y la temperatura, siendo casi insignificante a pH por debajo de 7.0 (Boyd, 2020; Randall & Tsui, 2002).

Como señalan Prinčič et al., (1998), los valores

Figura 3

Tendencia del amoníaco por densidad de siembra y tipo de tanque en el prototipo de sistema acuapónico



óptimos de pH para la nitrificación se sitúan entre 7.0 y 8.0, con un mínimo observado de 5.8. De manera similar, Grunditz & Dalhammar (2001) establecen condiciones óptimas específicas: *Nitrosomonas* spp. presenta su máxima actividad a pH 8.1, mientras que *Nitrobacter* spp. lo hace a pH 7.9. Por lo tanto, la acidez del medio (pH $\approx$ 5.5) teóricamente supondría una limitación significativa para la eficiencia del proceso de nitrificación. No obstante, los resultados obtenidos —concentraciones mínimas de nitritos (Figura 4) y acumulación gradual de nitratos (Figura 5)— refutan esta limitación teórica. Esta aparente contradicción sugiere que la sinergia entre las macrófitas y las comunidades bacterianas epífitas en su rizosfera crea un microambiente que permite el desarrollo metabólico de los nitrificadores, superando las limitaciones impuestas por el pH del agua circundante.

Nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$)

Las concentraciones de nitrito se mantuvieron consistentemente en niveles muy bajos (< 0.06 mg/L) en todas las densidades y a lo largo de los muestreos (Figura 3). Este resultado evidencia una conversión eficiente del amonio a nitrito y, posteriormente, una oxidación rápida de nitrito a nitrato. Esto demuestra que el sistema radicular de las macrófitas proporciona un soporte suficiente para el establecimiento de colonias bacterianas epífitas nitrificantes, constituyendo un biofiltro funcional sin necesidad de recurrir a lechos adicionales para la formación de biofilm. Este diseño logró evitar los picos de nitrito típicos en las fases iniciales de los sistemas de recirculación, un desafío común debido a la toxicidad de este compuesto (Sikora et al., 2020). El desempeño contrasta favorablemente con lo reportado para sistemas de recirculación acuícola (RAS) convencionales, resaltando el papel estabilizador del componente vegetal en el ciclo del nitrógeno acuapónico (Sikora et al., 2020).

Figura 4

Tendencias del nitrito por densidad de siembra y tipo de tanque en el prototipo de sistema acuapónico

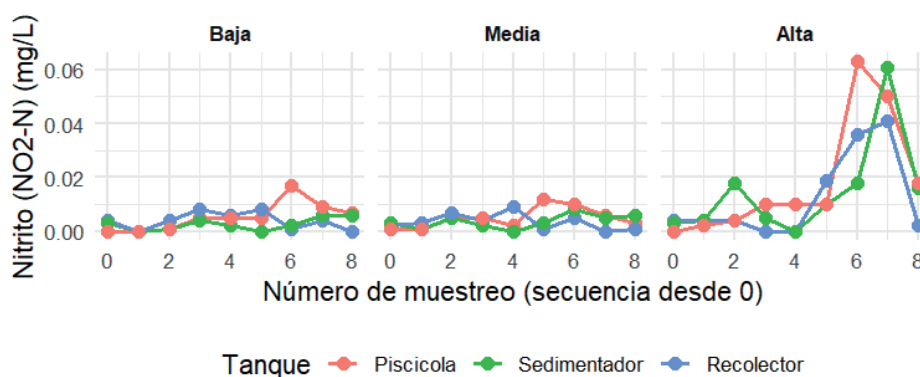
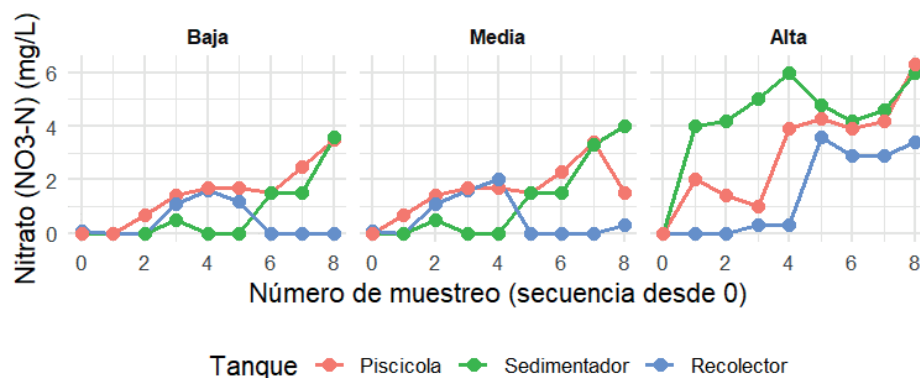


Figura 5

Tendencias del nitrato por densidad de siembra y tipo de tanque en el prototipo de sistema acuapónico



Nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$)

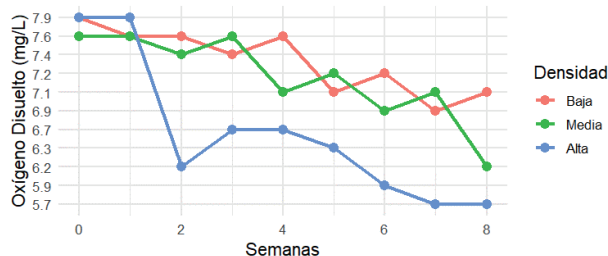
Se observó una acumulación gradual de nitratos en el sistema, particularmente en los tanques de biorremediación y recolector (Figura 4). Esta tendencia es esperada y confirma el funcionamiento completo del ciclo de nitrificación. La acumulación controlada de nitratos indica una oferta adecuada de nitrógeno biodisponible, el cual puede ser aprovechado como nutriente esencial para el crecimiento de cultivos de plantas terrestres integradas al sistema acuapónico, completando así el ciclo de remoción de este elemento.

Oxígeno Disuelto (OD) y su relación con la densidad

La concentración de oxígeno disuelto en el tanque piscícola mostró una correlación inversa con la densidad de siembra (Figura 6). Los valores medios de OD fueron más altos y estables en la densidad baja, y disminuyeron progresivamente en los tratamientos de densidad media y alta. Esta reducción refleja la mayor demanda respiratoria conjunta de la biomasa

Figura 6

Tendencia del oxígeno disuelto por densidad de siembra y tipo de tanque en el prototipo de sistema acuapónico



piscícola y de la comunidad microbiana asociada, cuya actividad aumenta con la carga orgánica.

A pesar de la tendencia descendente, los niveles de OD se mantuvieron dentro del rango considerado óptimo ($> 5 \text{ mg/L}$) para el cultivo de tilapia en etapa juvenil durante la mayor parte del experimento, sin observarse eventos de hipoxia. No obstante, la tendencia señalada sugiere que, de prolongarse el cultivo hacia la etapa de engorde con mayores biomasa, el oxígeno podría convertirse en un factor limitante. Por lo tanto, se debe fortalecer la capacidad de aireación del sistema al extender el ciclo productivo.

CONCLUSIONES

El prototipo de sistema acuapónico evaluado demostró ser efectivo para el manejo de los compuestos nitrogenados tóxicos en el cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*) bajo las densidades de 18, 27 y 55 peces/ m^3 sin recurrir a recambios de agua. La reducción progresiva de la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ entre el tanque sedimentador y el recolector confirma su capacidad como unidad de tratamiento activo, que no solo recircula el agua, sino que la mejora cualitativamente al remover el principal metabolito nitrogenado tóxico, garantizando un ambiente seguro para los peces.

Este desempeño se fundamenta en la sinergia entre dos componentes clave: (a) Condiciones fisicoquímicas favorables: Un pH consistentemente ácido (≈ 5.5) suprimió la formación de amoníaco libre (NH_3), favoreciendo la prevalencia de la forma no tóxica de amonio (NH_4^+), lo cual protegió a los organismos y proporcionó sustrato para la nitrificación. (b) Biofiltro rizosférico eficiente: A pesar de un pH no óptimo para la nitrificación, el sistema radicular de las macrófitas actuó como soporte y estimulante del desarrollo de bacterias nitrificantes epífitas (*Nitrosomonas spp.*), permitiendo una conversión eficiente de amonio a nitrato sin acumulación de nitritos.

En consecuencia, el diseño del prototipo se considera validado para mantener la calidad del agua y el bienestar de la tilapia juvenil en los rangos de densidad estudiados. La principal limitación identificada fue la correlación negativa entre la densidad y el oxígeno disuelto, lo cual sugiere que, para ciclos de engorde más prolongados o densidades superiores, será necesario fortalecer la aireación del sistema.

El principal aporte de este trabajo es la validación de un diseño de sistema acuapónico escalado y replicable que utiliza macrófitas nativas para la biofiltración, una alternativa de bajo costo de sostenimiento y fácil manejo para comunidades con limitaciones de infraestructura. Los resultados demuestran que es posible mantener densidades productivas (hasta 55 peces m^{-3}) con una excelente eficiencia alimenticia ($\text{FCR} < 1.0$) y sin dependencia de tecnologías complejas de filtración, haciendo el sistema más accesible y sostenible económicamente.

Una limitación reconocida de este estudio es la evaluación secuencial de las densidades de siembra en un único sistema, sin la inclusión de réplicas físicas. Aunque este enfoque es común en estudios de validación a escala piloto, investigaciones futuras podrían incorporar réplicas experimentales para

fortalecer la robustez estadística, siempre que se disponga de mayor financiación que permita ampliar su implementación en más comunidades. Adicionalmente, sería pertinente evaluar el desempeño del sistema a lo largo de ciclos completos de engorde, incorporando un análisis económico detallado que considere el costo-beneficio del uso de plantas acuáticas nativas en comparación con otros métodos de filtración.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

El protocolo experimental para el uso de tilapia en esta investigación fue aprobado por el Comité Institucional de Cuidado y Uso de Animales (CICUA) de la Universidad de La Salle, Colombia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación utilizó infraestructura donada por la Cruz Roja Colombiana a la institución educativa Concentración de Desarrollo Rural, en el marco de los proyectos “Acuaponía: espacios de inclusión y empoderamiento de las familias en su seguridad alimentaria” (2023) y “Producción sostenible: alternativas agrarias, la fungicultura y la acuaponía como modelos para una seguridad alimentaria” (2024)

REFERENCIAS

- Bakke, I., Åm, A. L., Kolarevic, J., Ytrestøyl, T., Vadstein, O., Attramadal, K. J. K., & Terjesen, B. F. (2017). Microbial community dynamics in semi-commercial RAS for production of Atlantic salmon post-smolts at different salinities. *Aquacultural Engineering*, 78, 42–49. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2016.10.002>
- Blancheton, J. P., Attramadal, K. J. K., Michaud, L., d'Orbcastel, E. R., & Vadstein, O. (2013). Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. *Aquacultural Engineering*, 53, 30–39. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.009>
- Boyd, C. E. (2020). *Water Quality*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Camargo-Castellanos, J. C., Flores-García, L., Herrera-Díaz, I. E., Álvarez-González, C. A., Albertos-Alpuche, P. J., & Martínez-Yáñez, R. (2022). System management of Lemna minor in aquaponics. *Aquaculture Research*, 53(3), 974–988. <https://doi.org/10.1111/ARE.15637>
- Department of Primary Industries. (2008). *Best practice environmental management guidelines for recirculating aquaculture systems*. Dept. of Primary Industries, Fisheries Victoria. <https://vfa.vic.gov.au/aquaculture/publications/best-practice-environmental-management-guidelines-for-recirculating-aquaculture-systems/>
- Ellawala, C., Asaeda, T., & Kawamura, K. (2012). The effect of flow turbulence on growth, nutrient uptake and stable carbon and nitrogen isotope signatures in Chara fibrosa. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 48(3), 349–354. <https://doi.org/10.1051/LIMN/2012024>
- Francis-Floyd, R. (2001). *Sanitation Practices for Aquaculture Facilities | Engormix*. https://en.engormix.com/aquaculture/aquaculture-industry/sanitation-practices-aquaculture-facilities_n11915/
- Gao, J., Li, L., Hu, Z., Yue, H., Zhang, R., & Xiong, Z. (2016). Effect of ammonia stress on nitrogen metabolism of Ceratophyllum demersum. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(1), 205–211. <https://doi.org/10.1002/ETC.3182>
- Grunditz, C., & Dalhammar, G. (2001). Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter. *Water Research*, 35(2), 433–440. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00312-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00312-2)
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). *Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents*. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Mandal, R. N., & Bera, P. (2024). Macrophytes Used as Multifaceted Benefits Including Feeding, Bioremediation, and Symbiosis in Freshwater Aquaculture—A Review. *Reviews in Aquaculture*, 17(1), e12983. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12983>
- Oktaviyani, D., Pratiwi, N. T. M., Krisanti, M., Chrismada, T., & Susanti, E. (2024). The Potential of Floating Treatment Wetlands for Pollutant

- Removal in the Recirculating Aquaculture System of Catfish. *Journal of Ecological Engineering*, 25(4), 111–118. <https://doi.org/10.12911/22998993/183822>
- Prinčič, A., Mahne, I., Megušar, F., Paul, E. A., & Tiedje, J. M. (1998). Effects of pH and Oxygen and Ammonium Concentrations on the Community Structure of Nitrifying Bacteria from Wastewater. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(10), 3584. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.10.3584-3590.1998>
- Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1–12), 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)
- Sikora, M., Nowosad, J., Kucharczyk, D., Sikora, M., Nowosad, J., & Kucharczyk, D. (2020). Comparison of Different Biofilter Media During Biological Bed Maturation Using Common Carp as a Biogen Donor. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, 10(2). <https://doi.org/10.3390/APP10020626>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2006.09.014>
- Wang, R., Xu, S., Sun, H., Feng, S., Jiang, C., Zhou, S., Wu, S., Zhuang, G., Chen, B., Bai, Z., & Zhuang, X. (2019). Complex regulatory network allows *Myriophyllum aquaticum* to thrive under high-concentration ammonia toxicity. *Scientific Reports*, 9(1), 4801. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41236-8>
- Yi, N., Gao, Y., Long, X. hua, Zhang, Zhi yong, Guo, J. yao, Shao, H. bo, Zhang, Zhen hua, & Yan, S. hua. (2014). *Eichhornia crassipes* cleans wetlands by enhancing the nitrogen removal and modulating denitrifying bacteria community. *Clean - Soil, Air, Water*, 42(5), 664–673. <https://doi.org/10.1002/CLEN.201300211>
- Zhou, Q., Chen, T., & Han, S. (2017). Characteristics of bacterial communities in cyanobacteria-blooming aquaculture wastewater influenced by the phytoremediation with water hyacinth. *Water (Switzerland)*, 8(12), 956. <https://doi.org/10.3390/w9120956>
- Zimmermann, S., Kiessling, A., & Zhang, J. (2023). The future of intensive tilapia production and the circular bioeconomy without effluents: Biofloc technology, recirculation aquaculture systems, bio-RAS, partitioned aquaculture systems and integrated multitrophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15(S1), 22–31. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12744>