

Aplicación de un modelo de economía circular en un sistema multitrófico urbano con *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*

RESUMEN: La acuicultura urbana a pequeña escala enfrenta limitaciones técnicas y económicas, principalmente asociadas al alto costo del alimento comercial y al manejo ineficiente de nutrientes en sistemas con infraestructura limitada. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad técnica y económica de un modelo de economía circular aplicado a un sistema multitrófico urbano integrado por *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*, orientado a la sustitución parcial del alimento balanceado mediante biomasa interna.

La investigación se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental comparativo con dos sistemas IMTA operados bajo recirculación acuícola. Se monitorearon semanalmente parámetros fisicoquímicos del agua (amoníaco, nitritos, nitratos, pH, sólidos disueltos totales, conductividad y temperatura) y se registraron peso y talla cada dos semanas. El análisis se realizó mediante estadística descriptiva, calculando medias, desviaciones estándar y variaciones porcentuales entre tratamientos.

Ambos sistemas mantuvieron estabilidad fisicoquímica y crecimiento sostenido de los organismos. El sistema con sustitución parcial del alimento comercial redujo en 38 % el costo de alimentación respecto al sistema convencional, sin afectar el desempeño productivo.

Los resultados evidencian que la integración multitrófica bajo principios de economía circular es técnicamente viable y económicamente favorable en sistemas acuícolas urbanos de pequeña escala con infraestructura limitada.

PALABRAS CLAVE: Economía circular, acuicultura urbana, sistemas multitróficos, sostenibilidad, reciclaje de nutrientes.



Colaboración

Denisse Arleth López Díaz; Gustavo Martínez Castellanos, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Isidro Rodríguez Montoro, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre; Alan Antonio Rico Barragán; Dana Yamileth Cano Vicencio, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Small-scale urban aquaculture faces technical and economic constraints, mainly associated with the high cost of commercial feed and inefficient nutrient management in systems with limited infrastructure. The objective of this study was to evaluate the technical and economic viability of a circular economy model applied to an urban multitrophic system composed of *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis*, and *Lemna minor*, aimed at partially replacing balanced feed with internal biomass.

The research was conducted under a comparative quasi-experimental design with two IMTA systems operated under aquaculture recirculation. Physical-chemical parameters of the water (ammonia, nitrites, nitrates, pH, total dissolved solids, conductivity, and temperature) were monitored weekly, and weight and size were recorded every two weeks. The analysis was performed using descriptive statistics, calculating means, standard deviations, and percentage variations between treatments.

Both systems maintained physicochemical stability and sustained growth of the organisms. The system with partial replacement of commercial feed reduced feed costs by 38 % compared to the conventional system, without affecting productive performance.

The results show that multitrophic integration under circular economy principles is technically feasible and economically favorable in small-scale urban aquaculture systems with limited infrastructure.

KEYWORDS: Circular economy, urban aquaculture, multitrophic systems, sustainability, nutrient recycling.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la urbanización y el uso intensivo de recursos naturales han evidenciado las limitaciones del modelo productivo lineal, particularmente en los sistemas agroalimentarios urbanos, donde la disponibilidad de agua, espacio e insumos representa un reto constante para la sostenibilidad [1], [2]. En este contexto, la economía circular surge como un enfoque alternativo que promueve la reducción de residuos, el reciclaje de materiales y el cierre de ciclos de materia y energía dentro de los sistemas productivos [3], [4].

En el ámbito acuícola, los sistemas multitróficos integrados (IMTA) permiten aplicar estos principios mediante la interacción de organismos de distintos niveles tróficos, donde los desechos metabólicos de una especie son aprovechados por otras, incrementando la eficiencia ecológica y reduciendo la dependencia de insumos externos como piensos y fertilizantes [5], [10]. En sistemas con recirculación de agua, esta integración puede fortalecer el reciclaje interno de nutrientes y mejorar la estabilidad ambiental del cultivo [6], [11].

Diversos estudios han demostrado que los sistemas acuapónicos e integrados pueden contribuir a la sostenibilidad ambiental y a la optimización del uso del agua [7], [8]. Asimismo, análisis recientes de la evolución global de la acuicultura resaltan la necesidad de modelos productivos más eficientes y adaptables a distintos contextos territoriales [9].

No obstante, la mayor parte de la literatura se ha concentrado en sistemas semi-intensivos o intensivos con infraestructura especializada y mayores niveles de automatización. Aunque estos modelos muestran eficiencia productiva, su implementación resulta limitada en entornos urbanos de pequeña escala con infraestructura simplificada y recursos restringidos. Además, son escasos los estudios experimentales que integren simultáneamente el desempeño productivo, la estabilidad fisicoquímica del agua y el análisis económico en sistemas IMTA urbanos de baja escala [10], [12].

Esta brecha científica limita la transferencia tecnológica hacia sistemas urbanos con capacidades técnicas reducidas, donde la viabilidad económica depende en gran medida de la reducción de costos operativos, particularmente del alimento balanceado, que constituye uno de los principales gastos en la producción acuícola [12].

En este contexto, el presente estudio evalúa experimentalmente un modelo de economía circular aplicado a un sistema multitrófico urbano a pequeña escala, integrado por *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor*, bajo recirculación acuícola. El enfoque se centra en la sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna, el aprovechamiento de nutrientes y la evaluación técnica y económica del sistema.

El objetivo de esta investigación es proponer y evaluar un modelo de economía circular en un sistema multitrófico urbano, orientado a mejorar el reciclaje de nutrientes y fortalecer la sostenibilidad ambiental y económica en contextos urbanos con infraestructura limitada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar de ejecución del estudio

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Veracruz, México, bajo condiciones ambientales abiertas en un entorno urbano. El estudio se realizó en un sistema experimental de acuicultura multitrófica a baja escala, para evaluar la aplicación de principios de economía circular en contextos urbanos.

Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental comparativo, de tipo aplicado y experimental. Se evaluaron dos sistemas acuícolas multitróficos con recirculación de agua (IMTA), operados de manera paralela y bajo condiciones controladas similares, diferenciados únicamente por el esquema de alimentación aplicado.

Unidad experimental

La unidad experimental correspondió a cada sistema acuícola multitrófico completo, integrado por el tanque de cultivo, tanque sedimentador y cama de biofiltración. Cada sistema operó como una unidad independiente para la comparación técnica y económica de los tratamientos.

Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por organismos acuáticos de diferentes niveles tróficos en dos sistemas idénticos. La muestra experimental incluyó 30 ejemplares de *Oreochromis niloticus*, con un peso inicial promedio de 10 ± 2 g. Asimismo, se integraron 60 caracoles adultos (*Lymnaea stagnalis*) y 100 g de biomasa húmeda de *Lemna minor* en los reservorios como organismos recicladores de nutrientes y productores de biomasa.

Tratamientos experimentales

El factor de estudio fue el tipo de alimentación, con dos tratamientos:

- IMTA-1 (referencia): alimentación comercial convencional (GrowFish).
- IMTA-2 (economía circular): sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna (*Lemna minor* y *Lymnaea stagnalis*).

En el IMTA-2, la sustitución se realizó dos días por semana, manteniendo equivalencia en peso respecto a la ración diaria correspondiente.

Procedencia de materiales y organismos

Los ejemplares de *Oreochromis niloticus* fueron adquiridos de un proveedor acuícola regional. *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* se obtuvieron de cultivos propios

de la unidad productiva BioAquaFlex del ITSM. La Lemna fue incorporada a la cama de biofiltración y *Lymnaea stagnalis* fue agregado al tanque sedimentador donde posteriormente se adhirió a las paredes del mismo. Se construyeron dos sistemas idénticos a partir de contenedores tipo IBC de 1,100 L, tanques plásticos auxiliares de 200 L y tubería de PVC de 1½ pulgadas. La recirculación se realizó mediante una bomba sumergible de 18 W con un caudal nominal de 1,200 L/h para cada sistema.

Descripción del sistema y condiciones de operación

Cada sistema multitrófico estuvo conformado por un estanque de cultivo principal, tanque sedimentador y cama de biofiltración como se muestra en la Figura 1. El oxígeno disuelto se mantuvo en niveles de 6.0 +/- 1 mg/L mediante aireación continua con una bomba AQC-007. No se realizaron recambios totales de agua durante el periodo experimental; únicamente se repusieron pérdidas por evaporación y mantenimiento del tanque mecánico, equivalentes a aproximadamente el 9 % mensual del volumen total. Todas las mediciones se realizaron utilizando unidades del Sistema Internacional (SI).

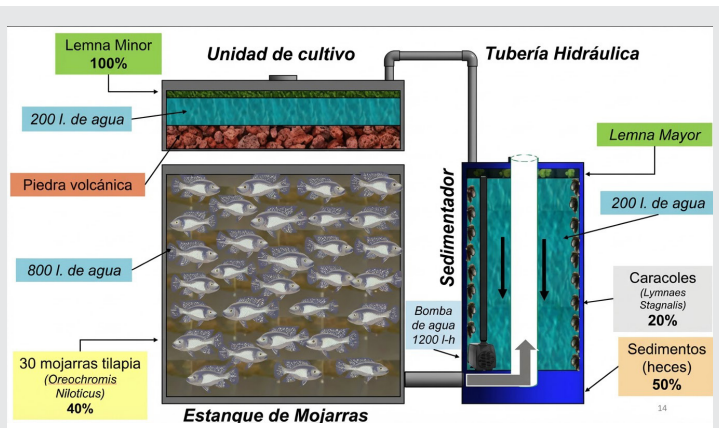


Figura 1. Funcionamiento del sistema multitrófico urbano.
Fuente: Elaboración propia.

Factores, niveles y tratamientos

El factor principal de estudio fue el tipo de alimentación, en dos condiciones; alimentación comercial convencional de la marca Growfish (IMTA-1) y alimentación con sustitución parcial mediante biomasa interna de *Lemna minor* y *Lymnaea stagnalis* (IMTA-2).

El tratamiento experimental que se desarrolló en el IMTA-2 consistió en la sustitución del alimento comercial dos días por semana (2 y 5): un día con biomasa fresca de *Lemna minor* y un día con *Lymnaea stagnalis* triturado. El sistema con alimentación convencional (IMTA 1) se consideró como tratamiento de referencia para la comparación operativa.

La sustitución del alimento convencional se realizó en función de la ración diaria correspondiente, manteniendo la equivalencia en peso. En el caso de Lemna minor, la biomasa se recolecta directamente de la cama de biofiltración, se escurre para eliminar el exceso de agua,

posteriormente se pone en papel absorbente por 30 minutos y se procede a pesarla en una báscula OHAUS Compass™ (CX Báscula - 220 gramos x 0.1 g) antes de ser suministrada a los peces. De manera similar, para la sustitución con *Lymnaea stagnalis*, los caracoles se extraen del tanque sedimentador para escurrirlos con un colador, se procede a ponerlos en papel absorbente durante 30 minutos y pesarlos. Posteriormente, la biomasa se tritura manualmente con un mortero hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se suministró como alimento alternativo a los peces.

Métodos, técnicas y equipos de medición

El peso y la talla de los organismos en experimentación se registraron manualmente cada dos semanas. De acuerdo con la tabla de recomendaciones del plan de nutrición de GrowFish, durante los primeros cuatro periodos la alimentación se suministró cuatro veces al día, con una ración total equivalente al 8 % del peso corporal, la cual fue ajustada conforme al peso registrado. Posteriormente, la ración se modificó al 5 % del peso corporal de acuerdo con las indicaciones del proveedor comercial. Por lo que se realizó un cambio en la etapa del alimento, pasando de Desarrollo Bioferling 1.5 a Crecimiento Grow-Tilapia 2. Para los tres periodos restantes, la alimentación se redujo a tres dosis diarias, con una ración total equivalente al 4 % del peso corporal.

Los parámetros fisicoquímicos del agua: se monitorearon semanalmente. El oxígeno disuelto y la temperatura se midieron con un medidor digital portátil (AZ86021); el pH, la microconductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (TDS) se determinaron con un equipo multiparamétrico (Hanna HI98129); los compuestos nitrogenados (amoníaco, nitritos y nitratos) se analizaron mediante kits colorimétricos comerciales, siguiendo las especificaciones del fabricante (Api Freshwater Master Test Kit).

Enfoque de análisis de datos

El análisis de datos se realizó mediante estadística descriptiva, calculando medias y desviaciones estándar para cada variable. Las diferencias entre tratamientos se analizaron mediante la comparación de tendencias temporales y la variación porcentual de los indicadores productivos, fisicoquímicos y económicos.

RESULTADOS

Los sistemas multitróficos urbanos operaron durante todo el periodo experimental sin fallas estructurales ni hidráulicas. Ambos sistemas mantuvieron recirculación continua bajo las mismas condiciones operativas.

Crecimiento productivo

La Figura 2 muestra la evolución del peso promedio (\pm desviación estándar) de *Oreochromis niloticus* en los sistemas IMTA-1 e IMTA-2. En ambos tratamientos se registró un incremento progresivo del peso corporal durante el periodo experimental. Las curvas de crecimiento presentaron tendencias similares entre sistemas.

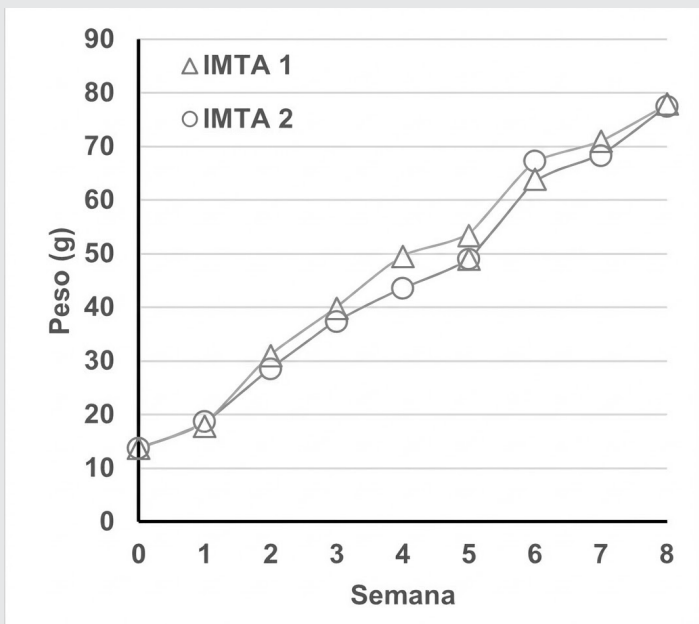


Figura 2. Comparación del peso promedio y desviación estándar de *Oreochromis niloticus* en el sistema IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

La sustitución parcial del alimento comercial mediante biomasa interna no evidenció efectos negativos sobre el aumento de peso, manteniéndose una tendencia de crecimiento acorde con sistemas de recirculación acuícola de baja densidad.

En relación con la talla, la Figura 3 presenta el crecimiento promedio en longitud (\pm desviación estándar). En ambos sistemas se observó un aumento sostenido del tamaño corporal a lo largo del periodo de evaluación, sin variaciones abruptas en las mediciones registradas.

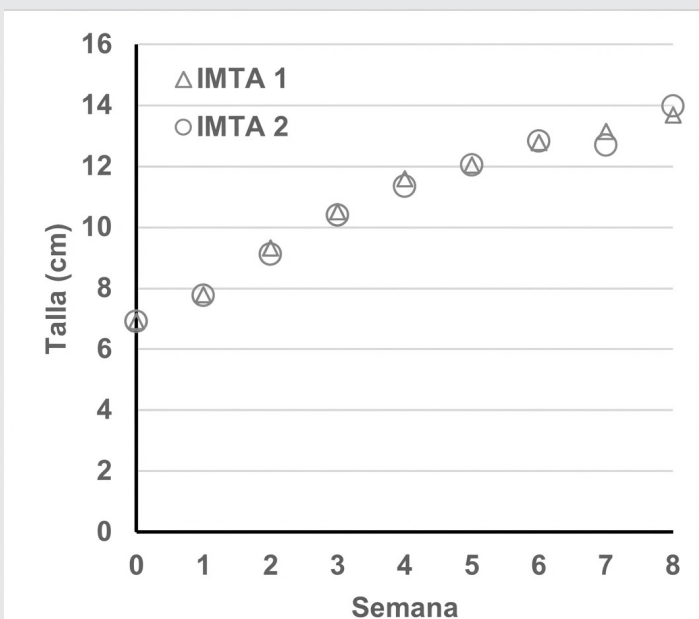


Figura 3. Comparación del tamaño promedio y desviación estándar de *Oreochromis niloticus* en el sistema IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

De manera conjunta, los resultados de peso y tamaño confirman que el esquema multitrófico implementado permitió un crecimiento normal de los peces, aún con la aplicación de una estrategia de economía circular basada en la sustitución parcial de insumos externos. Las gráficas de peso y talla evidencian la compatibilidad del modelo propuesto con el desempeño productivo esperado en sistemas acuícolas urbanos a baja escala.

Parámetros fisicoquímicos

Las concentraciones de amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), presentadas en la Figura 4, se mantuvieron en niveles bajos en ambos sistemas durante todo el periodo experimental.

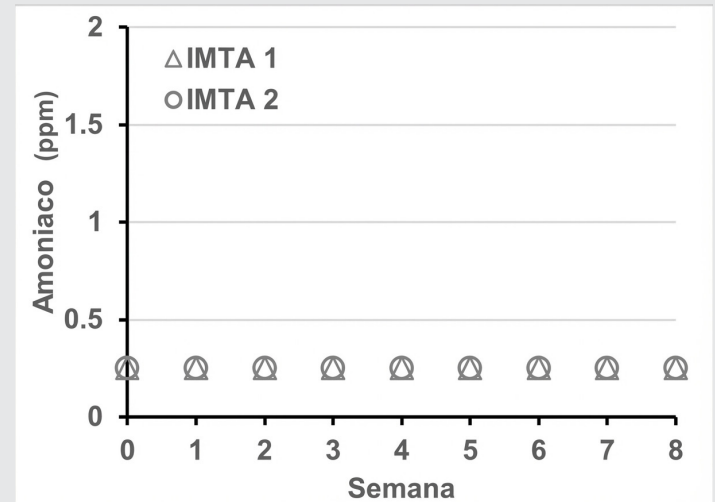


Figura 4. Comparación de las concentraciones de amoníaco (NH_3) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de nitritos (NO_2^-), mostrados en la Figura 5, registraron concentraciones similares entre IMTA-1 e IMTA-2.

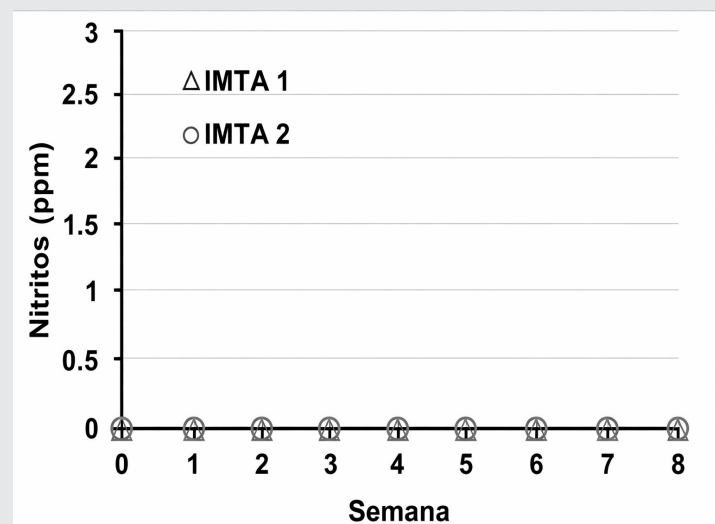


Figura 5. Comparación de las concentraciones de nitritos (NO_2) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones de nitratos (NO_3^-), ilustradas en la Figura 6, permanecieron estables a lo largo del monitoreo.

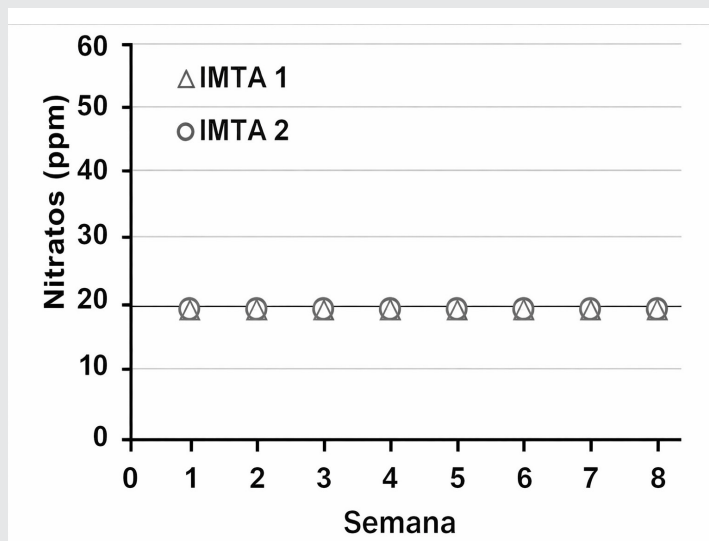


Figura 6. Comparación de las concentraciones de nitratos (NO_3^-) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

El pH (Figura 7) se mantuvo cercano a la neutralidad en ambos sistemas. Los sólidos disueltos totales (Figura 8) y la conductividad eléctrica (Figura 9) presentaron comportamientos similares y sin variaciones significativas entre tratamientos.

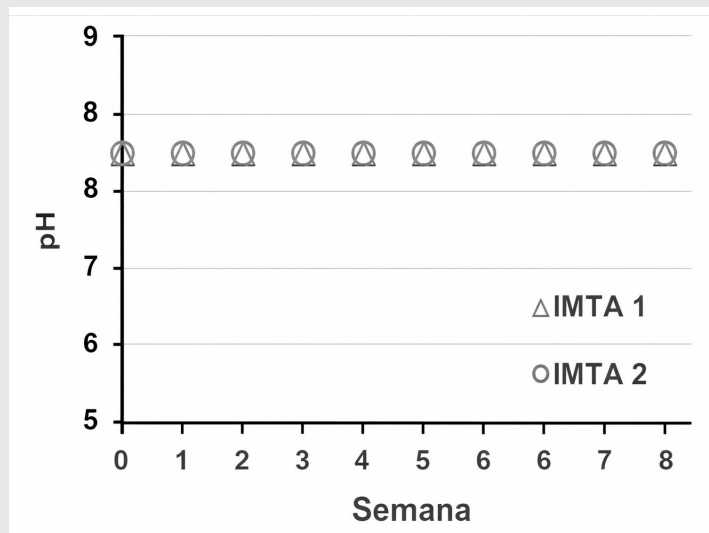


Figura 7. Comparación pH en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2. Fuente: Elaboración propia.

Uso de agua

El sistema operó sin recambios totales de agua. Las reposiciones por evaporación y mantenimiento representaron aproximadamente el 9 % mensual del volumen total. El consumo hídrico estimado fue superior al 80 % menor en comparación con sistemas de recambio continuo.

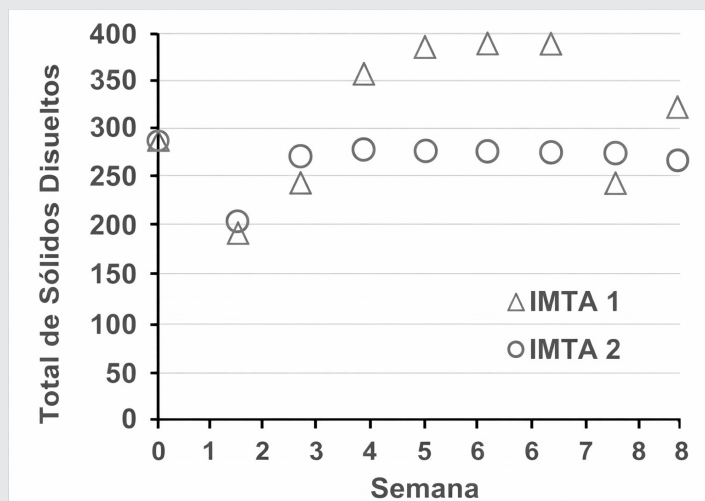


Figura 8. Comparación TDS (ppm) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2.

Fuente: Elaboración propia.

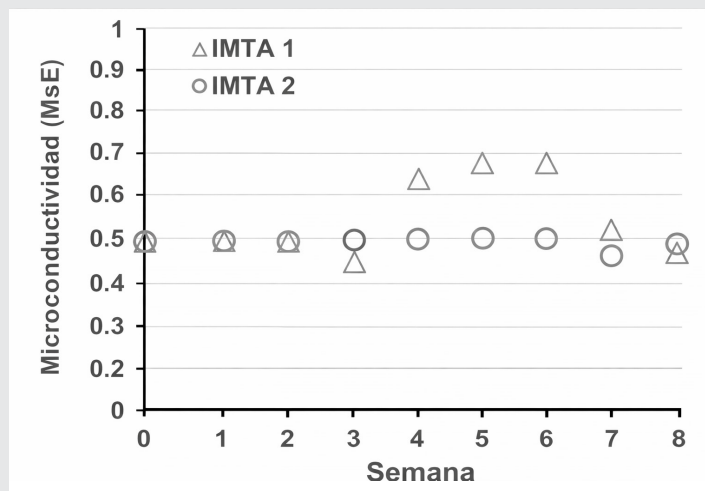


Figura 9. Comparación conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) en los sistemas IMTA 1 e IMTA 2.

Fuente: Elaboración propia.

Costos de alimentación

El sistema IMTA-2 presentó una reducción del 38 % en el costo de alimentación respecto al IMTA-1. El IMTA-1 registró un costo 61 % mayor en alimentación en comparación con el sistema con sustitución parcial.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que la integración de *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* en un sistema multitrófico urbano permitió mantener estabilidad en los parámetros físico-químicos del agua, así como un crecimiento sostenido de los organismos cultivados. La similitud en las curvas de peso y talla entre IMTA-1 e IMTA-2 indica que la sustitución parcial del alimento comercial no comprometió el desempeño productivo del sistema bajo las condiciones evaluadas.

Desde la perspectiva del ciclo del nitrógeno, el comportamiento estable de amoníaco, nitritos y nitratos sugiere que la integración trófica favoreció el reciclaje interno de nutrientes, reduciendo acumulaciones que pudieran afectar la calidad del agua. Este comportamiento coincide con estudios previos sobre sistemas IMTA, donde la incorporación de organismos contribuye a amortiguar las cargas metabólicas y mejorar la eficiencia ecológica del sistema.

En términos económicos, la reducción del 38 % en el costo de alimentación observada en IMTA-2 representa un impacto directo en la estructura de costos del cultivo. Dado que el alimento balanceado constituye uno de los principales gastos en la producción acuícola, la disminución de la dependencia externa mediante biomasa generada internamente representa una mejora significativa en la estructura de costos, especialmente en contextos urbanos con acceso limitado a insumos a precios competitivos.

A diferencia de investigaciones enfocadas en sistemas semi-intensivos o de mayor escala, el presente estudio aporta evidencia experimental en un modelo urbano con escasa infraestructura. Este enfoque amplía la aplicabilidad práctica de los principios de economía circular en sistemas acuícolas pequeños, demostrando que la integración multitrófica puede implementarse sin comprometer estabilidad técnica ni productividad.

No obstante, el estudio se desarrolló bajo condiciones controladas y a una escala experimental limitada, por lo que futuras investigaciones podrían evaluar periodos productivos más prolongados, diferentes densidades de cultivo y análisis estadísticos comparativos más robustos para consolidar la generalización de los resultados.

CONCLUSIONES

El modelo de economía circular evaluado demostró viabilidad técnica y económica en un sistema multitrófico urbano de pequeña escala, manteniendo estabilidad fisicoquímica y crecimiento productivo comparable entre tratamientos.

La integración de *Oreochromis niloticus*, *Lymnaea stagnalis* y *Lemna minor* permitió reducir en un 38 % el costo de alimentación mediante la sustitución parcial del alimento comercial, sin afectar el desempeño productivo del cultivo. Este resultado evidencia que el aprovechamiento interno de biomasa puede disminuir la dependencia de insumos externos en sistemas urbanos con recursos limitados.

El principal aporte del estudio consiste en proporcionar evidencia experimental técnica y económica

sobre la aplicación de principios de economía circular en un sistema IMTA urbano de pequeña escala y baja infraestructura, ampliando su aplicabilidad práctica en contextos locales.

Como limitaciones, el estudio se desarrolló a escala experimental y en un periodo productivo acotado, sin incluir análisis estadísticos inferenciales ni evaluaciones a mayor densidad de cultivo. Por ello, se recomienda realizar estudios de mayor duración y escala para validar la reproducibilidad y el potencial de escalamiento del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al TecNM por el proyecto aprobado en la Convocatoria 2025: Evaluación del efecto de *Saccharomyces cerevisiae* y *Bacillus amyloliquefaciens* sobre un sistema multitrófico de tilapia (*Oreochromis niloticus*), al equipo asesor y colaboradores por su acompañamiento en el desarrollo experimental y metodológico del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*, Rome, Italy: FAO, 2020.

[2] T. Vera-Acevedo and E. Raullet, "Circular economy: A framework for sustainable development," *Journal of Cleaner Production*, vol. 330, pp. 129–138, 2022.

[3] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Cowes, UK, 2013.

[4] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757–768, 2017.

[5] T. Chopin et al., "Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability," *Journal of Phycology*, vol. 37, no. 6, pp. 975–986, 2001.

[6] J. E. Rakocy, M. P. Masser, and T. M. Losordo, *Recirculating Aquaculture Systems: A Guide to Developing and Maintaining an Aquaponic System*, Stoneville, MS, USA: Southern Regional Aquaculture Center, 2006.

[7] S. Goddek and O. Körner, "A fully integrated model of multi-loop aquaponics for efficient system design," *Ecological Engineering*, vol. 138, pp. 8–20, 2019.

[8] F. Maucieri et al., "Aquaponics and sustainability: The comparison of conventional and integrated systems," *Aquaculture International*, vol. 26, pp. 213–227, 2018.



[9] R. L. Naylor et al., "A 20-year retrospective review of global aquaculture," *Nature*, vol. 591, pp. 551–563, 2021.

[10] M. Troell, A. Joyce, T. Chopin, A. Neori, A. H. Buschmann and J. G. Fang, "Ecological engineering in aquaculture – Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in land-based systems," *Aquaculture*, vol. 575, 739860, 2023.

[11] S. Goddek, O. Körner and B. Delaide, "Circularity and nutrient management in aquaponics and land-based RAS: A systems perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, 132674, 2022.

[12] A. A. Badiola, D. Mendiola and J. Bostock, "Economic performance of recirculating aquaculture systems (RAS): A review of recent advances and small-scale applications," *Aquacultural Engineering*, vol. 96, 102214, 2022.

