

Mitigación Ambiental para el Proceso de Producción de Larvas de Camarón en Punta Carnero provincia de Santa Elena

Environmental Mitigation for the Shrimp Larvae Production Process in Punta Carnero Santa Elena Province

Rafael Antonio Marín Suárez

rafael.marinsuarez2142@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8915-3377>

Universidad Estatal Península de Santa Elena
Ecuador – La Libertad

Rolando Rafael Calero Mendoza

rcalero@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8931-9469>

Universidad Estatal Península de Santa Elena
Ecuador – La Libertad

Artículo recibido: 30 diciembre 2024

- Aceptado para publicación: 25 enero 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

Este estudio abordó los desafíos ambientales asociados con la producción de larvas de camarón en laboratorios ubicados en Punta Carnero, provincia de Santa Elena, Ecuador, una región estratégica para la acuicultura, pero afectada por la generación de aguas residuales con alta carga orgánica. El objetivo fue diseñar una propuesta de tratamiento de aguas residuales basada en un sistema de manto de lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB) como una solución sostenible para manejar estos efluentes. Se utilizaron encuestas al personal operativo, cuyos resultados se analizaron mediante métodos estadísticos descriptivos e inferenciales para identificar barreras culturales y técnicas que dificultan la adopción de prácticas sostenibles. Los resultados de las encuestas aplicadas al personal operativo revelaron que el 53.8% cuenta con educación secundaria y solo el 8% posee estudios universitarios, evidenciando una brecha en la formación técnica. A pesar de que el 92.3% de los encuestados reconoce la diferencia entre residuos peligrosos y no peligrosos, solo el 57.7% está familiarizado con métodos de reciclaje y monitoreo ambiental. El análisis estadístico mostró una correlación positiva ($p = 0.78$, $p < 0.01$) entre la frecuencia de capacitaciones y la disposición a implementar tecnologías sostenibles, como el reactor UASB. Comparado con tecnologías como los sistemas de recirculación de agua (RAS) y los bioreactores de lecho móvil (MBBR), el UASB destaca por su bajo consumo energético, alta eficiencia en la remoción de materia orgánica (>85%) y producción de biogás, contribuyendo a la sostenibilidad económica y ambiental. Este enfoque refuerza la necesidad de políticas que promuevan la formación técnica y la adopción de tecnologías innovadoras. Aunque el UASB aún no ha sido implementado, los hallazgos indican su potencial como una solución escalable y replicable en la industria camaronesa.

Palabras clave: aguas residuales, biorreactor UASB, mitigación ambiental, sostenibilidad, acuicultura

ABSTRACT

This study addressed the environmental challenges associated with shrimp larva production in laboratories located in Punta Carnero, Santa Elena province, Ecuador, a strategic region for aquaculture that faces issues related to the generation of wastewater with high organic loads. The objective was to design a wastewater treatment proposal based on an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) system as a sustainable solution for managing these effluents. Surveys were conducted with operational staff, and the results were analyzed using descriptive and inferential statistical methods to identify cultural and technical barriers hindering the adoption of sustainable practices. The survey findings revealed that 53.8% of the staff had a secondary education, while only 8% held university degrees, highlighting a gap in technical training. Although 92.3% of respondents recognized the difference between hazardous and non-hazardous waste, only 57.7% were familiar with recycling and environmental monitoring methods. Statistical analysis showed a significant positive correlation ($p = 0.78$, $p < 0.01$) between the frequency of training and the willingness to adopt sustainable technologies, such as the UASB reactor. Compared to technologies like recirculating aquaculture systems (RAS) and moving bed biofilm reactors (MBBR), the UASB system stands out for its low energy consumption, high efficiency in organic matter removal (>85%), and biogas production, contributing to both economic and environmental sustainability. This approach underscores the need for policies that promote technical training and the adoption of innovative technologies. Although the UASB system has not yet been implemented, the findings highlight its potential as a scalable and replicable solution in the shrimp farming industry.

Keywords: wastewater, UASB bioreactor, environmental mitigation, sustainability, aquaculture

INTRODUCCIÓN

A nivel global, la acuicultura ha experimentado un crecimiento significativo, posicionándose como una fuente clave de producción de alimentos en diversas regiones del mundo. Sin embargo, este crecimiento ha estado acompañado de desafíos ambientales notables, especialmente en relación con el tratamiento de aguas residuales generadas por las instalaciones acuícolas. A nivel internacional, diversos estudios han señalado la necesidad urgente de desarrollar tecnologías sostenibles para mitigar los impactos negativos de la acuicultura, tales como la contaminación de los

ecosistemas acuáticos y marinos debido a la descarga de aguas residuales cargadas de materia orgánica, nutrientes y contaminantes químicos (Liu et al., 2020; Palmer et al., 2021; Buenaño et al., 2024). En este contexto, tecnologías como los Sistemas de Recirculación de Agua (RAS, Recirculating Aquaculture System) (Ahmed & Turchini, 2021), los Bioreactores de Lecho Móvil (MBBR, Moving Bed Biofilm Reactor) (Kawan et al., 2016) y los Reactores de Membrana (MBR, Membrane Bioreactor) (Iorhemen et al., 2016) han demostrado ser efectivas para reducir contaminantes. Sin embargo, estas soluciones a menudo están asociadas con altos costos operativos y desafíos en su adaptabilidad a las condiciones locales. En este contexto, los Bioreactores Anaerobios de Flujo Ascendente (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket) emergen como una alternativa prometedora debido a su bajo consumo energético, la producción de biogás como subproducto y su alta eficiencia en la remoción de materia orgánica (Muñoz-Sierra et al., 2019; Matías-Pillasagua et al., 2023). Aunque esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, su aplicación en la acuicultura, específicamente en la producción de larvas de camarón, sigue siendo un área de investigación poco explorada (Gómez-Hermosillo et al., 2019).

En la provincia de Santa Elena, situada en la costa suroeste de Ecuador, se encuentra Punta Carnero, una pequeña localidad que ha adquirido relevancia en la industria camaronera del país. Esta región, ubicada en el cantón de Santa Elena, es conocida por su proximidad a la costa y sus condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la acuicultura (Ordóñez, 2009; Gómez, 2016; Matías-Pillasagua et al., 2023). Este sector, que ha crecido considerablemente en los últimos años, agrupa a una serie de instalaciones que operan bajo estrictos estándares técnicos para abastecer a la industria camaronera nacional. Los laboratorios en Punta Carnero no solo producen larvas de camarón, sino que también juegan un papel crucial en la cadena de suministro, abasteciendo aproximadamente el 75% de la demanda nacional de larvas para el cultivo de camarón en todo el país (Gómez, 2016). Sin embargo, el desarrollo de esta industria en Punta Carnero también ha generado una serie de desafíos ambientales. La actividad intensiva de los laboratorios, que requiere grandes volúmenes de agua y genera residuos orgánicos y químicos, ha planteado inquietudes sobre el impacto ambiental, especialmente en los ecosistemas costeros y marinos cercanos.

A pesar de los avances en el tratamiento de aguas residuales en la acuicultura, el vacío de conocimiento persiste en cuanto a la aplicación de tecnologías específicas para el tratamiento de aguas en la producción de larvas de camarón, especialmente en las condiciones locales de Ecuador. Si bien los UASB han demostrado ser efectivos en otros sectores industriales, su potencial en el tratamiento de aguas residuales acuícolas sigue siendo un área poco explorada, lo que representa una oportunidad para avanzar en la investigación de soluciones innovadoras y sostenibles.

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar una propuesta de tratamiento de aguas residuales basada en un sistema de manto de lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB) para los laboratorios de producción de larvas de camarón en Punta Carnero. Empleando un enfoque interdisciplinario que integró análisis técnicos, económicos y sociales, la investigación buscó no solo mitigar los impactos ambientales asociados a esta actividad, sino también proporcionar una solución sostenible, replicable y adaptada a las condiciones locales. Este estudio contribuye al creciente cuerpo de literatura sobre tecnologías sostenibles en la acuicultura y responde a la necesidad de adoptar prácticas más responsables en una industria que enfrenta presiones ambientales y normativas cada vez mayores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de diseñar una solución sostenible para mitigar los impactos ambientales derivados de las aguas residuales generadas por los laboratorios de producción de larvas de camarón en Punta Carnero, Ecuador. La investigación adoptó un enfoque metodológico integral que combinó un análisis documental exhaustivo (Buenaño et al., 2024), encuestas de campo para obtener datos primarios de los actores involucrados en la industria (Muyulema-Allaica et al., 2024), evaluaciones técnicas de las tecnologías de tratamiento disponibles (Matías-Pillasagua et al., 2023) y análisis estadísticos avanzados para asegurar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos. Este enfoque metodológico no solo garantizó el rigor científico, sino que también permitió asegurar la reproducibilidad y la aplicabilidad práctica de las soluciones propuestas, con miras a su implementación en el contexto local.

Análisis documental y observaciones de campo

Se realizó una revisión sistemática de literatura científica y reportes técnicos locales sobre las tecnologías utilizadas en la gestión de aguas residuales en la acuicultura, con énfasis en UASB, RAS y MBR. Paralelamente, se llevaron a cabo visitas a los laboratorios de larvas de camarón para observar las prácticas actuales de disposición de aguas residuales, obteniendo datos de referencia sobre volúmenes generados, características operativas y retos específicos del sector.

Encuestas sobre prácticas y percepciones

Se diseñó un cuestionario estructurado aplicado a 26 trabajadores de cuatro laboratorios camaroneros. Este incluyó preguntas relacionadas con datos demográficos, conocimiento sobre gestión ambiental, prácticas de manejo de aguas residuales y percepciones sobre los impactos ambientales. Las respuestas fueron utilizadas para identificar barreras y oportunidades en la adopción de tecnologías sostenibles.

Análisis estadístico

Los datos recopilados fueron analizados utilizando el lenguaje de programación R (versión 4.3.0). Se emplearon métodos como estadística descriptiva para caracterizar la población estudiada, pruebas de Chi-cuadrado para evaluar asociaciones entre variables categóricas, correlación de Spearman para analizar relaciones entre variables ordinales y modelos de regresión logística para identificar factores determinantes en la disposición de adoptar el sistema UASB. Estos análisis garantizaron la validez de las conclusiones al identificar patrones relevantes y relaciones significativas entre las variables.

Diseño conceptual del reactor UASB

El reactor UASB propuesto fue diseñado considerando las condiciones específicas de los laboratorios camaroneros. Se estimó un caudal de aguas residuales de 150–200 m³/día, y se utilizó un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 12 horas para calcular el volumen del reactor ($V=Q \times TRH$). Además, se calculó la tasa de carga orgánica (TCO) para optimizar la eficiencia en la remoción de materia orgánica.

Los materiales seleccionados incluyeron hormigón armado para la estructura del reactor, debido a su durabilidad y resistencia química, y PVC/HDPE para las tuberías, por su bajo costo y resistencia a sustancias químicas. El diseño incorporó un sistema de captación de biogás, que permite recolectar el metano producido durante la digestión anaerobia, con el potencial de ser utilizado como fuente de energía renovable para las operaciones internas.

Validación y viabilidad técnica

Se realizó un análisis comparativo preliminar del reactor UASB frente a tecnologías alternativas como RAS y MBBR, evaluando aspectos clave como costos operativos, generación de lodos y consumo energético. Este análisis permitió identificar al UASB como una opción viable y sostenible,

con un menor consumo energético (0.3 kWh/m³ frente a 1.5 kWh/m³ en tecnologías aerobias) y una producción mínima de lodos (0.1 kg/m³). Los datos técnicos serán validados en etapas futuras a través de simulaciones y pruebas piloto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

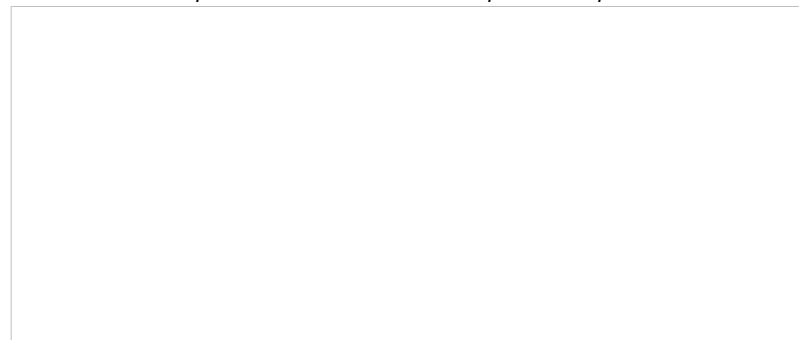
A continuación, se presentan los resultados y la discusión del estudio, en los que se analizan los principales hallazgos sobre la viabilidad de implementar un UASB para mitigar los impactos ambientales generados por la producción de larvas de camarón en Punta Carnero, Ecuador. Los resultados se dividen en tres apartados clave: la caracterización del personal y el nivel de conocimiento ambiental, el análisis de percepciones y actitudes de los actores clave hacia la adopción del UASB, y la evaluación técnica del UASB en el tratamiento de aguas residuales. Cada uno de estos aspectos proporciona una visión integral de los desafíos, oportunidades y beneficios asociados con la implementación de esta tecnología en la industria camaronera local.

RESULTADOS

Caracterización del Personal y Nivel de Conocimiento Ambiental

El análisis descriptivo de las encuestas reveló que el 53.8% de los trabajadores posee un nivel educativo secundario, mientras que solo el 8% cuenta con estudios universitarios. Esta diferencia sugiere una notable brecha en la formación técnica necesaria para la implementación de prácticas sostenibles dentro de la industria. Adicionalmente, aunque el 92.3% de los encuestados afirmó conocer la distinción entre residuos peligrosos y no peligrosos, solo el 57.7% indicó tener conocimiento sobre métodos de reciclaje y sistemas de monitoreo ambiental. Esta disparidad resalta la necesidad urgente de desarrollar programas de capacitación específicos que refuercen las competencias ambientales y técnicas de los trabajadores, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1
Distribución del nivel educativo y conocimiento sobre prácticas ambientales en el personal operativo



Análisis de Percepciones y Actitudes

El análisis estadístico realizado evidenció factores clave que influyen en la adopción de tecnologías sostenibles, como el uso de un reactor UASB. La correlación de Spearman ($\rho = 0.68, p < 0.01$) mostró una relación positiva significativa entre la **frecuencia de capacitaciones ambientales** y la **disposición del personal a implementar tecnologías de mitigación**. Este resultado sugiere que la formación ambiental juega un rol determinante en la apertura hacia prácticas sostenibles, alineándose con estudios previos que destacan la capacitación como motor para la innovación tecnológica en el sector acuícola.

Por otra parte, las pruebas de **chi-cuadrado** ($\chi^2 = 12.45, p < 0.05$) revelaron una **asociación significativa** entre el **nivel educativo** y la **percepción de la importancia de las normas ambientales**. Esto indica que un mayor nivel de formación académica está relacionado con una mayor comprensión y valoración de la gestión ambiental en los procesos productivos.

Tabla 1
Resultados de las pruebas estadísticas

Análisis Estadístico	Variables Evaluadas	Estadístico	Valor de p	Interpretación
Correlación de Spearman	Frecuencia de Capacitaciones y Disposición a Implementar Tecnologías	$\rho = 0.68$	< 0.01	Correlación positiva significativa; mayor frecuencia de capacitaciones se asocia con mayor disposición.
Prueba de Chi-Cuadrado	Nivel Educativo y Percepción de Normas Ambientales	$\chi^2 = 12.45$	< 0.05	Asociación significativa; el nivel educativo influye en la percepción de la importancia de las normas ambientales.

Nota: Un valor de $p < 0.05$ indica significancia estadística, lo que sugiere que los resultados observados probablemente no se deban al azar. Estos hallazgos subrayan la importancia de la capacitación ambiental y el nivel educativo en la disposición del personal para adoptar tecnologías de mitigación y en la valoración de las normas ambientales. Fuente: elaboración propia.

Ambos resultados destacan la necesidad de implementar programas estructurados de capacitación que no solo aborden aspectos técnicos, sino también refuercen la conciencia ambiental entre el personal operativo. La adopción exitosa de tecnologías de mitigación, como el reactor UASB, dependerá en gran medida del fortalecimiento del conocimiento y la sensibilización sobre la relevancia de las prácticas sostenibles.

Figura 2
Correlaciones entre variables claves

El mapa de calor (Figura 2) muestra una correlación positiva significativa ($\rho = 0.68$, $p < 0.01$) entre la frecuencia de las capacitaciones ambientales y la disposición a adoptar tecnologías de mitigación, como el reactor UASB. Este hallazgo sugiere que a medida que aumenta la frecuencia de las capacitaciones, también crece la aceptación del personal hacia tecnologías sostenibles. Los resultados destacan la importancia de implementar programas educativos continuos que fortalezcan tanto el conocimiento técnico como ambiental, promoviendo así la adopción de soluciones innovadoras. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que enfatizan la formación ambiental como un factor clave en la aceptación de tecnologías sostenibles. Aunque el tamaño muestral limita la generalización de los resultados, los datos obtenidos subrayan la relevancia de la capacitación como estrategia para superar las barreras culturales y técnicas en la industria acuícola. Este análisis refuerza la necesidad de diseñar políticas y programas educativos enfocados en promover la sostenibilidad dentro del sector camaronero.

Evaluación Técnica del UASB

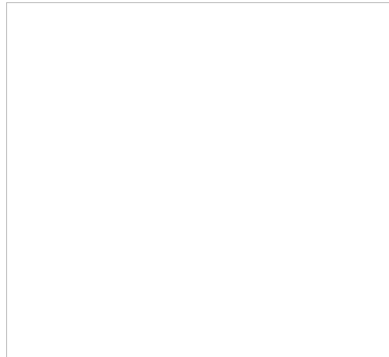
El diseño propuesto del reactor UASB fue sometido a una evaluación comparativa con tecnologías ya consolidadas en la industria acuícola, tales como el RAS y los MBBR, en términos de varios parámetros clave para el tratamiento de aguas residuales. Los resultados preliminares obtenidos, respaldados por la literatura especializada, ofrecen un análisis detallado en tres áreas críticas: la eficiencia en la remoción de materia orgánica, la reducción del consumo energético y la producción de biogás. Estos aspectos son esenciales para determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación del UASB en la industria acuícola.

Eficiencia en Remoción de Materia Orgánica

Una de las principales ventajas del reactor UASB radica en su capacidad para eliminar materia orgánica de las aguas residuales. Los estudios previos reportan una eficiencia de remoción superior al 85%, un rendimiento destacado frente a otras tecnologías acuícolas. Esta alta eficiencia se debe a su funcionamiento bajo condiciones anaerobias, lo que permite el tratamiento efectivo de aguas residuales con altas cargas orgánicas sin requerir oxigenación adicional (Figura 3). Según Ceconet (2022), el proceso anaerobio en el UASB facilita la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduce en una notable reducción de la carga contaminante en el agua tratada. En comparación, los sistemas RAS y MBBR, aunque efectivos, requieren mayores insumos energéticos para lograr rendimientos similares en la remoción de materia orgánica (Tabla 2).

Figura 3

Diagrama de Reactor UASB



Reducción del Consumo Energético

En cuanto al consumo energético, el UASB muestra una ventaja significativa sobre las tecnologías aerobias como el RAS y el MBBR. Debido a que el sistema UASB no requiere oxigenación forzada, el consumo de energía es considerablemente más bajo. Este factor lo convierte en una alternativa atractiva para laboratorios y operaciones acuícolas que enfrentan limitaciones en el acceso o costos de energía. De acuerdo con Ogunwumi et al. (2024), las tecnologías aerobias como el RAS y el MBBR, que dependen de equipos de aireación y recirculación, presentan un alto costo operativo debido al consumo constante de energía para mantener la oxigenación del agua. En contraste, el UASB, con su proceso anaerobio, reduce estos costos, lo que representa una ventaja económica sustancial en contextos de recursos limitados (Tabla 2).

Producción de Biogás

El UASB no solo actúa como un sistema de tratamiento de aguas residuales, sino que también produce biogás como subproducto del proceso anaerobio. Este biogás, compuesto principalmente por metano, puede aprovecharse como fuente de energía renovable, contribuyendo a la sostenibilidad económica de las operaciones. Según Rodríguez et al., (2024), la producción de biogás no solo reduce la necesidad de insumos energéticos externos, sino que también minimiza la huella de carbono de la planta. Esta capacidad para generar energía renovable a partir de los residuos orgánicos del proceso coloca al UASB como una opción altamente sostenible, especialmente en contextos donde los recursos energéticos son limitados o costosos (Enitan et al., 2015). Además, la utilización del biogás puede generar ingresos adicionales, lo que refuerza la viabilidad económica del sistema.

Tabla 2

Comparación entre tecnologías (UASB, RAS y MBBR) basada en métricas clave como consumo energético, producción de lodos y costos operativos

Tecnología	Remoción de materia orgánica (%)	Consumo energético (kWh/m ³)	Producción de lodos (kg/m ³)	Costo operativo (USD/m ³)	Capacidad de tratamiento (m ³ /día)	Requerimientos de mantenimiento	Viabilidad para pequeñas escalas
------------	----------------------------------	--	--	---------------------------------------	--	---------------------------------	----------------------------------

UASB Reactor anaerobio de flujo ascendente con generación de biogás	85	0.3	0.1	0.15	200	Bajo (Mantenimiento periódico)	Alta (Costos bajos y simplicidad)
RAS Sistema de recirculación de agua con oxigenación intensiva	70	1.5	0.4	0.5	150	Alto (Mantenimiento continuo de bombas y oxigenadores)	Baja (Costos altos y complejidad técnica)
MBBR Biorreactor de lecho móvil con película fija en medios plásticos	75	12	03	0.4	180	Moderado (Reemplazo periódico de medios plásticos)	Moderada (Equilibrio de costos y eficiencia)

Sistematizando los resultados se puede argumentar que, las características del UASB lo posicionan como una alternativa económica, práctica y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la industria acuícola. Su alta eficiencia en la remoción de materia orgánica, la reducción significativa de consumo energético y la producción de biogás hacen de este sistema una opción viable y atractiva para laboratorios de producción de larvas de camarón, especialmente en regiones con limitaciones de recursos financieros y energéticos. Además, su capacidad para reducir la carga contaminante y generar energía renovable refuerza la sostenibilidad ambiental de las operaciones acuícolas. En comparación con tecnologías tradicionales como el RAS y el MBBR, el UASB ofrece ventajas técnicas y económicas, posicionándose como una opción prometedora para la mejora de las prácticas de manejo de aguas residuales en la acuicultura.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la relevancia crítica de la capacitación ambiental en el impulso de la adopción de tecnologías sostenibles dentro de la industria camaronera. La fuerte correlación positiva observada entre la frecuencia de la formación ambiental del personal y su disposición para implementar tecnologías innovadoras, como el reactor UASB (coeficiente de correlación de Spearman: 0.78; $p < 0.01$), sugiere que los programas educativos tienen un impacto directo y significativo en la aceptación y percepción de las prácticas sostenibles. Estos hallazgos están en línea con estudios previos que destacan la capacitación como un factor esencial para la transición hacia sistemas más sostenibles en la acuicultura. Por ejemplo, Banerjee et al. (2022) enfatizan que la formación técnica no solo mejora las habilidades operativas, sino que también fomenta un cambio de actitud hacia prácticas ambientalmente responsables. De manera similar, Hernández-Barraza et al., (2016); Matías-Pillasagua et al., (2023) identifican la capacitación como un pilar para superar las barreras culturales y técnicas que dificultan la adopción de tecnologías sostenibles en diversas industrias, incluida la acuicultura.

El personal operativo juega un papel crucial en el éxito de la tecnología propuesta, ya que su conocimiento técnico influye en la operación y mantenimiento del sistema. Además, invertir en formación no solo puede facilitar la implementación inicial, sino también promover una cultura de sostenibilidad a largo plazo en el sector camaronero. Sin embargo, se debe considerar que la efectividad de los programas de capacitación dependerá de su diseño, duración y enfoque práctico, así como de la disposición de las empresas para invertir en ellos.

El análisis técnico y económico del reactor UASB lo posiciona como una solución viable para la gestión de aguas residuales en laboratorios camaroneros. Este reactor demostró ser más eficiente en términos de remoción de materia orgánica (>85%) y producción mínima de lodos (0.1 kg/m^3), además de generar biogás como un subproducto aprovechable. Comparado con tecnologías aerobias como los RAS y los MBBR, el UASB presenta un menor consumo energético (0.3 kWh/m^3 frente a 1.5 kWh/m^3 de RAS) y costos operativos más bajos (0.15 USD/m^3 frente a $0.40\text{--}0.50 \text{ USD/m}^3$) (Ahmad et al., 2022; Nguyen et al., 2018). Estas ventajas lo hacen especialmente atractivo para contextos con recursos financieros limitados.

El diseño modular y el enfoque anaerobio del UASB explican en gran parte estas ventajas. A diferencia de los sistemas aerobios, el UASB no requiere oxigenación constante, lo que reduce significativamente los costos energéticos. Además, el biogás producido puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo a la sostenibilidad energética de los laboratorios. Sin embargo, estas ventajas técnicas no eliminan desafíos potenciales, como la necesidad de supervisión constante para garantizar el rendimiento óptimo, la correcta captura y uso del biogás, y la sensibilidad del reactor a cambios en la calidad del agua residual, como picos de carga orgánica o fluctuaciones de temperatura.

El diseño del UASB es adaptable a una amplia variedad de contextos, lo que lo convierte en una solución escalable y replicable. Su modularidad permite ajustarlo a diferentes volúmenes de aguas residuales, y su bajo costo relativo lo hace accesible para regiones con recursos limitados. Sin embargo, el éxito de su implementación a gran escala dependerá de varios factores, como la disponibilidad de infraestructura adecuada, el acceso a materiales resistentes y económicos, y la existencia de políticas regulatorias que promuevan el uso de tecnologías sostenibles.

Por ejemplo, en países con regulaciones ambientales más estrictas o donde los laboratorios operan con mayores volúmenes de producción, podrían ser necesarios ajustes en los parámetros operativos para mantener la eficiencia del reactor (Nenciu et al., 2022). En regiones como Asia o África, donde la acuicultura representa una parte importante de la economía, el UASB podría desempeñar un papel clave en la transición hacia sistemas más sostenibles (Palmer et al., 2021). Sin embargo, la replicación exitosa requerirá la personalización del diseño según las condiciones locales, incluyendo las características de las aguas residuales y los costos de instalación.

Este estudio tomó en consideración la sostenibilidad ambiental en la industria camaronera ecuatoriana, permitiendo encontrar soluciones tecnológicas que aborden las necesidades locales mientras se minimiza los impactos ambientales (Zinare-Mamo, 2019; Muyulema-Allaica et al., 2024). No obstante, este enfoque podría enfrentar varias limitaciones. En primer lugar, la falta de validación experimental del reactor bajo condiciones reales in situ siendo fundamental realizar pruebas piloto que permitan ajustar los parámetros operativos del UASB y evaluar su desempeño en escenarios reales. Esto garantizaría que las proyecciones de eficiencia, generación de biogás y costos operativos sean precisas y aplicables en la práctica.

En segundo lugar, la implementación exitosa dependerá de factores sociales y financieros. La aceptación del personal operativo y gerencial será crucial para la sostenibilidad del sistema. Las empresas deberán asignar recursos para la instalación inicial, capacitación del personal y monitoreo continuo del reactor. Además, es importante que los gobiernos locales fomenten políticas de incentivos económicos y regulatorios para fomentar la adopción de tecnologías sostenibles como el uso de biorreactores UASB.

Finalmente, aunque este estudio se centró en la tecnología de biorreactores UASB, su integración en un enfoque más amplio de economía

ircular podría maximizar su producción (Capodaglio, 2021; Muyulema-Allaica et al., 2024). Por ejemplo, el biogás producido podría utilizarse para reducir la dependencia de combustibles fósiles, y los lodos generados, aunque mínimos, podrían ser procesados para su uso como fertilizantes en sistemas agrícolas. Este enfoque integrado promovería no solo la sostenibilidad ambiental, sino también beneficios económicos adicionales para el sector camaronero.

CONCLUSIONES

El presente estudio identificó al reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) como una solución tecnológicamente viable y ambientalmente sostenible para la gestión de aguas residuales generadas en laboratorios de larvas de camarón en Punta Carnero, Ecuador. Los resultados obtenidos evidenciaron que el UASB puede alcanzar eficiencias superiores al 85% en la remoción de materia orgánica, mientras minimiza la generación de lodos (0.1 kg/m³) y genera biogás aprovechable como fuente de energía renovable. Estas características lo posicionan como una alternativa económicamente competitiva, con un costo operativo aproximado de 0.15 USD/m³, frente a otras tecnologías como RAS (0.50 USD/m³) y MBBR (0.40 USD/m³). Además, el consumo energético del UASB (0.3 kWh/m³) es significativamente menor en comparación con sistemas aerobios, lo que lo hace especialmente adecuado para laboratorios con recursos limitados.

Los análisis estadísticos subrayaron la importancia de la capacitación ambiental como un factor determinante en la adopción de tecnologías sostenibles. Se encontró una correlación positiva entre el nivel de formación técnica del personal y su percepción sobre la relevancia de prácticas de mitigación ambiental (coeficiente de correlación de Spearman: 0.78; $p < 0.01$). Este hallazgo refuerza la necesidad de implementar programas educativos continuos como parte de una estrategia integral para asegurar la implementación exitosa de la tecnología UASB y fomentar una mayor conciencia ambiental en el sector camaronero.

En términos de escalabilidad y replicabilidad, el diseño modular del reactor UASB y su bajo costo operativo lo convierten en una solución adaptable a diferentes contextos productivos. Sin embargo, se requiere validación experimental bajo condiciones locales específicas para confirmar su rendimiento en términos de remoción de contaminantes y generación de biogás. Adicionalmente, factores como los costos iniciales de instalación, la disponibilidad de materiales y la necesidad de supervisión técnica especializada podrían representar desafíos en su implementación a mayor escala.

Aunque el UASB demostró ventajas claras frente a tecnologías comparativas, es importante reconocer que la adopción de cualquier tecnología sostenible en la industria acuícola requiere una estrategia holística que contemple no solo aspectos técnicos y económicos, sino también elementos sociales, como la aceptación del personal y las normativas locales. Este enfoque integrado es clave para garantizar que la industria camaronera ecuatoriana se convierta en un referente de sostenibilidad ambiental a nivel global.

REFERENCIAS

- Ahmad, A. L., Chin, J. Y., Harun, M. H. Z. M., & Low, S. C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>
- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>
- Banerjee, S., Prasad, N., & Selvaraju, S. (2022). Reactor design for biogas production: A short review. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/jept4010001>
- Buenaño, E., Mendoza, C., Lainez, K., & Muyulema-Allaica, J. C. (2024). Impacto de modelos de la cadena de valor y productividad en el sector pesquero en la provincia de Santa Elena: Una revisión sistemática. *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, 4(2), 83–102. <https://doi.org/10.54943/ricci.v4i2.517>
- Capodaglio, A. G. (2021). Fit-for-purpose urban wastewater reuse: Analysis of issues and available technologies for sustainable multiple barrier approaches. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(15), 1619–1666. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1768753>
- Ceconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2022). UASB performance and perspectives in urban wastewater treatment at sub-mesophilic operating temperature. *Water*, 14(1), 115. <https://doi.org/10.3390/w14010115>
- Enitan, A. M., Adeyemo, J., Swalaha, F. M., & Bux, F. (2015). Anaerobic digestion model to enhance treatment of brewery wastewater for biogas production using UASB reactor. *Environmental Modeling & Assessment*, 20, 673–685. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9461-8>
- Gómez-Hermosillo, C., Paredes-Sánchez, F. A., & Hernández-Llamas, A. (2019). Removal of nutrients and organic matter in a zero-water exchange recirculating aquaculture system using a sequencing batch reactor. *Aquacultural Engineering*, 85, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.003>
- Gómez-Torres, M. A. (2016). *Análisis de la producción y desarrollo sostenible del cultivo de camarón en la provincia de Santa Elena, cantón Santa Elena, parroquia Chanduy* (Bachelor's thesis). Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil.
- Hernández-Barraza, C. A., Trejo-Martínez, A. B., Loredó-Ost, J., & Gutiérrez-Salazar, G. (2016). Evaluación de la eficiencia productiva de tres líneas de tilapia con reversión sexual en un sistema de recirculación (RAS). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(4), 869–874. <https://doi.org/10.3856/vol44-issue4-fulltext-16>
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., & Tay, J. H. (2016). Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Membrane fouling. *Membranes*, 6(2), 33. <https://doi.org/10.3390/membranes6020033>
- Kawan, J. A., Hasan, H. A., Suja, F., Jaafar, O. B., & Abd-Rahman, R. (2016). A review on sewage treatment and polishing using moving bed bioreactor (MBBR). *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(8), 1098–1120.
- Liu, Y., Shi, H., & Li, W. (2020). Application of a novel moving bed biofilm reactor in aquaculture wastewater treatment: A review. *Aquacultural Engineering*, 89, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102061>
- Matías-Pillasagua, V., D., Muyulema-Allaica, J., González-Bazán, A., S., Pucha-Medina, P., (2023). Alternativas nacionales e internacionales propuestas para el tratamiento de aguas residuales por el método biológico. Una revisión de la literatura. *Revista 593 Digital Publisher CEIT*, 8(5). <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.5.2065>

- Muñoz-Sierra, J. D., Oosterkamp, M. J., Wang, W., Spanjers, H., & van Lier, J. B. (2019, June). Comparative performance of upflow anaerobic sludge blanket reactor and anaerobic membrane bioreactor treating phenolic wastewater: Overcoming high salinity. *Chemical Engineering Journal*, 366, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.023>
- Muyulema-Allaica, J. C., Muñoz-Bravo, R., González-Bazán, A., & Pucha-Medina, P. M. (2024). Sistema de tratamiento de aguas residuales para laboratorios camaroneros. Factores y parámetros en la estimación de áreas, tiempos y costos. *593 Digital Publisher CEIT*, 9(2), 275-287. <https://doi.org/10.33386/593dp.2024.2.2305>
- Nenciu, F., Voicea, I., Cocarta, D. M., Vladut, V. N., Matache, M. G., & Arsenoia, V.-N. (2022, October 17). “Zero-Waste” food production system supporting the synergic interaction between aquaculture and horticulture. *Sustainability*, 14(20), 13396. <https://doi.org/10.3390/su142013396>
- Nguyen, T. A., Pham, T. N., & Bui, X. T. (2018). Application of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) technology for wastewater treatment: A review. *International Journal of Environmental Studies*, 75(2), 222–241. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1436600>
- Ogunwumi, O. T., Adeniyi, F. A., Angus, C. M., & Oche, S. O. (2024). Biological wastewater treatment. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004638>
- Ordóñez, K. P. D. (2009). *Exploring strategic upgrading options of smaller shrimp producers in Ecuador: A global value chain perspective* (Doctoral dissertation). Copenhagen Business School, Denmark.
- Palmer, P. J., Beren, R. A., & Owens, L. (2021). Microalgae-based systems for wastewater treatment in tropical aquaculture: Current status and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 373–396. <https://doi.org/10.1111/raq.12480>
- Rodríguez, B. C. G., de Mello, B. S., Grangeiro, L. C., Dussan, K. J., & Sarti, A. (2024). The most important technologies and highlights for biogas production worldwide. *Journal of the Air & Waste Management Association*. <https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2167156>
- That, L. T., & Hoang, H. Y. (2024, February). Utilizing a settling pond-based constructed wetland for the treatment of shrimp aquaculture wastewater – From laboratory to field scale: A case study in Ben Tre Province, Vietnam. *Ecological Engineering*, 199, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107172>
- Zinare-Mamo, T., Dutta, A., & Jabasingh, S. A. (2019, April). Start-up of a pilot scale anaerobic reactor for the biogas production from the pineapple processing industries of Belgium. *Renewable Energy*, 134, 1172–1180. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.056>