

Evaluación comparativa del desempeño técnico y productivo entre un sistema de recirculación acuícola (RAS) tradicional y modificado en el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*)

Leidy Yurani Camperos Rincón, David Galvis Rincón

Trabajo de Grado para Optar al Título de Zootecnista

Director

José Eduardo Acevedo Espinel

Médico Veterinario Zootecnista

Codirector

Luisa Fernanda Mendoza Morales

Zoot. MSc, PhD (c).

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de zootecnia

Bucaramanga.

2026

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo, en primera medida a Dios, por brindarnos la fortaleza, la sabiduría y perseverancia necesarias para finalizar esta etapa. A nosotros mismos, por el esfuerzo, la disciplina y la constancia demostrada a lo largo de todo este proceso. Y a nuestra familia, por su apoyo, sus palabras y su motivación permanente.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros tutores por la orientación, la enseñanza y los conocimientos compartidos y suministrados durante el desarrollo de este trabajo, así como a todas las personas que estuvieron involucradas directa como indirectamente y aportaron de alguna manera para que esta investigación pudiera realizarse.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
2. Objetivos.....	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Marco de Antecedentes.....	17
3.1 Antecedentes Internacionales.....	17
3.2 Antecedentes Nacionales.....	20
4. Marco Teórico.....	21
4.1 Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS).....	21
4.2 Componentes técnicos del sistema RAS.....	22
4.2.1 Filtración mecánica:.....	22
4.2.2 Filtración biológica y nitrificación:.....	23
4.2.3 Tanques de Cultivo.....	23
4.2.4 Biofiltro.....	24
4.3 Fundamentos de la Nitrificación.....	26
4.3.1 El ciclo del nitrógeno.....	26
4.4 Manejo de la calidad del agua en RAS.....	28
4.4.1 Parámetros de calidad del agua.....	28
4.5 Diferencias estructurales y funcionales entre RAS tradicional y modificado.....	31
4.5.1 Tilapia roja (<i>Oreochromis sp.</i>) como modelo productivo.....	32
5. Metodología.....	34

5.1 Área de Investigación: Población y Muestra	34
5.2 Tipo y Diseño de la Investigación.....	35
5.3 Diseño de los sistemas de recirculación acuícola (RAS)	36
5.4 Manejo del cultivo, siembra y alimentación.....	37
5.5 Técnicas e Instrumentos	39
5.6 Etapas de la Investigación	42
5.6.1 Primera Etapa.....	42
5.6.2 Segunda Etapa.....	44
5.6.3 Tercera Etapa..	44
5.6.4 Cuarta Etapa.....	44
5.7 Análisis de datos	44
5.8 Costos.....	45
6. Resultados.....	48
6.1 Primera Etapa. Implementar y acondicionar los sistemas de recirculación acuícola (RAS)...	48
6.2 Segunda Etapa. Analizar la calidad del agua en ambos sistemas durante el periodo de estudio.....	53
6.3 Tercera Etapa. Conocer el crecimiento, biomasa y mortalidad de la tilapia roja en los dos sistemas.....	65
7. Discusión	75
8. Conclusiones	79
9. Recomendaciones.....	80
Referencias Bibliográficas.....	81

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	40
Tabla 2. Rangos mínimos estables de calidad del agua en los sistemas RAS	43
Tabla 3. Costo de implementación de los sistemas RAS	45
Tabla 4. Consumo en Kg del sistema tradicional	47
Tabla 5. Consumo en Kg del sistema modificado tipo DHS.....	47
Tabla 6. Costo de alimentación de cada sistema.	48
Tabla 7. Caracterización inicial del sistema RAS tradicional	51
Tabla 8. Caracterización inicial del sistema RAS modificado tipo DHS.....	52
Tabla 9. Programa de alimentación sistema tradicional.....	72
Tabla 10. Programa de alimentación sistema DHS	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de biofiltro sumergido	25
Figura 2. Ciclo de nitrógeno en sistemas acuáticos	28
Figura 3. Proceso de nitrificación	30
Figura 4. Proceso de acondicionamiento inicial de los sistemas RAS previo a la etapa de maduración biológica	49
Figura 5. Montaje final de los sistemas de recirculación acuícola (RAS) tradicional y modificado tipo DHS.....	50
Figura 6. Instrumentos utilizados para el monitoreo de la calidad del agua en los sistemas RAS	54
Figura 7. Registro de información para su posterior análisis.	55
Figura 8. Día del sistema en funcionamiento vs Alto rango de pH.....	56
Figura 9. Día del sistema en funcionamiento Vs Amoniaco	57
Figura 10. Día del sistema en funcionamiento Vs Nitrito	59
Figura 11. Día del funcionamiento del sistema Vs Nitrato	60
Figura 12. Comportamiento semanal del pH y temperatura en el sistema modificado DHS.....	62
Figura 13. Comportamiento semanal de pH y temperatura de oxígeno el sistema tradicional	63
Figura 14. Promedio de oxígeno disuelto (mg/L) del sistema tradicional y modificado DHS	65
Figura 15. Pesaje y medición de los individuos de tilapia roja (Oreochromis sp.)	66
Figura 16. Registro de peso (g) por mes	68
Figura 17. Longitud total (cm) de los peces para el mes de febrero.	71

Glosario

Amonio (NH_4^+): forma ionizada del nitrógeno amoniacal presente en el agua, menos tóxica que el amoníaco no ionizado y utilizada como sustrato (Hargreaves, 2020).

Biofiltro: componente del sistema de recirculación acuícola donde se desarrollan bacterias nitrificantes que transforman compuestos nitrogenados tóxicos en formas menos perjudiciales (Summerfelt & Penne, 2017).

Biomasa: cantidad total de organismos vivos presentes en un sistema, expresada generalmente en peso (Boyd, 2020).

Calidad del agua: conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos que determinan la idoneidad del agua (FAO, 2022).

Crecimiento: incremento en peso y tamaño a través del tiempo que es el resultado de condiciones ambientales y nutricionales adecuadas (Martins et al., 2016).

Nitrificación: proceso biológico en el cual bacterias convierten el amonio en nitrito y luego este en nitrato, reduciendo la toxicidad del agua (van Rijn, 2017).

Nitrito (NO_2^-): compuesto intermedio del proceso de nitrificación, altamente tóxico para los peces cuando se acumula en grandes cantidades (van Rijn, 2017).

Nitrato (NO_3^-): producto final del proceso de nitrificación, con menor toxicidad relativa y cuya acumulación es común en los RAS (FAO, 2020).

Oxígeno disuelto (OD): cantidad de oxígeno disponible en el agua para la respiración de los organismos (Boyd, 2020).

pH: medida de la acidez o alcalinidad del agua que influye en la disponibilidad de nutrientes y en la toxicidad de los compuestos (FAO, 2022).

Sistema de recirculación acuícola (RAS): tecnología de cultivo que permite reutilizar el agua mediante procesos de filtración física, biológica y química (Badiola et al., 2018).

Sistema DHS: sistema de recirculación acuícola modificado que incorpora mejoras en biofiltración y dinámica hidráulica, mejorando la estabilidad del sistema y el crecimiento de los organismos (Badiola et al., 2018).

Supervivencia: organismos que permanecen vivos durante un periodo de cultivo, utilizada como indicador de desempeño productivo (Martins et al., 2016).

Resumen

Título: Evaluación comparativa del desempeño técnico y productivo entre un sistema de recirculación acuícola (RAS) tradicional y modificado en el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*)*

Autor: Leidy Yurani Camperos Rincón y David Galvis Rincón

Palabras Clave: sistema RAS, tilapia roja, calidad del agua, nitrificación, crecimiento, biomasa, supervivencia, acuicultura.

Descripción:

La investigación tuvo como objetivo comparar el desempeño de un sistema de recirculación acuícola tradicional y un sistema modificado tipo DHS en el cultivo de tilapia roja, evaluando la calidad del agua, el crecimiento, la biomasa y la supervivencia de los organismos. Este se llevó bajo condiciones controladas, con siembra inicial de 68 individuos en el primer sistema y 74 en el segundo, realizando un monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos. Los resultados evidenciaron que ambos sistemas mantuvieron condiciones adecuadas de calidad del agua, con valores de pH dentro de un rango medianamente alcalino y concentraciones de amonio y nitrito que luego se estabilizaron en valores cercanos a cero, lo que indica una adecuada nitrificación, no obstante, el sistema modificado se evidenció una mayor estabilidad en los parámetros evaluados. Referente al desempeño productivo, se observó un crecimiento en ambos sistemas; pero, el sistema modificado alcanzó mayores pesos individuales, con valores máximos de 152 frente a 143 gramos en el sistema tradicional, así como una mayor biomasa acumulada y una menor mortalidad.

En conclusión, aunque ambos sistemas mostraron viabilidad para el cultivo de tilapia roja, el sistema modificado tipo DHS presentó un mejor desempeño global, posicionándose como una alternativa más eficiente para la producción

*Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de zootecnia. Director: José Eduardo Acevedo Espinel. Médico Veterinario Zootecnista. Codirector: Luisa Fernanda Mendoza Morales. Zoot. MSc, PhD (c).

Abstract

Title: A comparative evaluation of the technical and production performance between a traditional and a modified recirculating aquaculture system (RAS) in the farming of red tilapia (*Oreochromis* sp.)

Author(s): Leidy Yurani Camperos Rincón and David Galvis Rincón

Key Words: RAS system, red tilapia, water quality, nitrification, growth, biomass, survival, aquaculture.†

Description:

The objective of the study was to compare the performance of a traditional recirculating aquaculture system and a modified DHS system in red tilapia farming, evaluating water quality, growth, biomass, and survival rates. The study was conducted under controlled conditions, with an initial stocking of 68 individuals in the first system and 74 in the second, and continuous monitoring of physicochemical parameters. The results showed that both systems maintained adequate water quality conditions, with pH values within a moderately alkaline range and ammonium and nitrite concentrations that later stabilized at values close to zero, indicating adequate nitrification; however, the modified system demonstrated greater stability in the evaluated parameters. Regarding production performance, growth was observed in both systems; however, the modified system achieved higher individual weights, with maximum values of 152 grams compared to 143 grams in the traditional system, as well as greater accumulated biomass and lower mortality.

In conclusion, although both systems proved viable for red tilapia farming, the modified DHS system demonstrated better overall performance, positioning itself as a more efficient alternative for production.

†Institute for Regional Development and Distance Education (IPRED). Animal Science Program. Director: José Eduardo Acevedo Espinel, DVM, Animal Scientist. Co-director: Luisa Fernanda Mendoza Morales, MSc, PhD (c).

Introducción

La acuicultura constituye uno de los sectores productivos de más rápido crecimiento en el mundo, desempeñando un papel fundamental en la provisión de proteína de origen animal y en la seguridad alimentaria de diversas regiones. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), la acuicultura ha experimentado un incremento sostenido en las últimas décadas, convirtiéndose en una alternativa estratégica frente a la pesca extractiva tradicional, que se encuentra limitada por la sobreexplotación de los recursos pesqueros. Este crecimiento, sin embargo, genera la necesidad de desarrollar sistemas de producción eficientes, sostenibles y tecnológicamente avanzados, capaces de optimizar el uso de los recursos naturales y minimizar los impactos ambientales.

En términos económicos, la acuicultura representa una fuente importante de ingresos y empleo, particularmente en países en desarrollo y regiones tropicales. La producción de especies de alto valor comercial, como la tilapia, permite a los productores locales acceder a mercados nacionales e internacionales, diversificando las fuentes de ingreso y fortaleciendo la economía regional (Boyd, 2020). Sin embargo, la expansión intensiva de los sistemas de cultivo tradicional enfrenta retos relacionados con el uso excesivo de agua, la acumulación de compuestos nitrogenados, la disminución de la calidad del agua y la propagación de enfermedades, lo que puede comprometer la sostenibilidad técnica y económica de la producción.

En este escenario, los sistemas de recirculación acuícola (RAS) han emergido como una solución tecnológica innovadora que busca incrementar la eficiencia de los procesos productivos y reducir los impactos ambientales. Los RAS permiten la reutilización del agua mediante procesos de filtración mecánica y biológica, lo que no solo disminuye el consumo hídrico sino que también

estabiliza las condiciones ambientales del cultivo, como la concentración de oxígeno disuelto, la temperatura y los compuestos nitrogenados, creando un entorno controlado y más predecible para las especies cultivadas (Timmons & Ebeling, 2018). Este tipo de sistemas es especialmente relevante en zonas con limitaciones de disponibilidad de agua, alta densidad poblacional o presión sobre los ecosistemas acuáticos naturales.

Entre las especies cultivadas mediante RAS, la tilapia roja (*Oreochromis sp.*) se destaca por su rápido crecimiento, capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y alta demanda comercial en mercados locales e internacionales (El-Sayed, 2019). La tilapia no solo es una fuente de proteína de bajo costo para las comunidades, sino que también posee un ciclo de producción relativamente corto, lo que la convierte en un candidato ideal para sistemas de cultivo intensivo controlados. Sin embargo, el rendimiento de esta especie está estrechamente ligado a la eficiencia del sistema de cultivo y al control de variables críticas, como la concentración de amonio, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto y temperatura, que pueden afectar su crecimiento, supervivencia y conversión alimenticia.

Históricamente, los RAS tradicionales han demostrado ser técnicamente viables para la producción intensiva de tilapia roja, proporcionando un entorno estable y eficiente para la cría de peces. No obstante, la creciente demanda de productividad y la presión por mejorar la sostenibilidad han impulsado el desarrollo de sistemas RAS modificados, que incorporan avances tecnológicos en el diseño de biofiltros, separación de sólidos, control hidráulico y automatización de monitoreo (Malone & Pfeiffer, 2006; Summerfelt & Penne, 2017). Estas modificaciones buscan optimizar la eficiencia del sistema, mejorar la estabilidad de la calidad del agua y favorecer un desempeño productivo superior en términos de crecimiento y supervivencia.

A pesar de los avances reportados en el diseño de RAS, existe una limitada evidencia científica que compare de manera directa y bajo condiciones equivalentes el desempeño técnico y productivo entre sistemas tradicionales y modificados. La mayoría de los estudios disponibles evalúan de forma independiente aspectos específicos de los sistemas, como la eficiencia de biofiltros, la eliminación de sólidos o el control de parámetros fisicoquímicos, pero no ofrecen un análisis integral que permita determinar si las modificaciones implementadas realmente generan ventajas significativas en indicadores de productividad y sostenibilidad. Esta brecha de conocimiento genera incertidumbre en los productores acuícolas, quienes enfrentan decisiones técnicas y económicas sobre la adopción de nuevas tecnologías sin contar con información concluyente.

Adicionalmente, el contexto ambiental global refuerza la relevancia de la investigación en sistemas RAS. La acuicultura intensiva, si no se gestiona adecuadamente, puede contribuir a la contaminación de cuerpos de agua, aumento de compuestos nitrogenados y fósforo, y proliferación de patógenos, afectando la biodiversidad local y la calidad ambiental (Gruber & Galloway, 2008). Por ello, el desarrollo y adopción de tecnologías que reduzcan el consumo de agua, optimicen la eficiencia productiva y mejoren la calidad del agua, como los RAS modificados, se consideran esenciales para garantizar la sostenibilidad del sector a mediano y largo plazo.

En este sentido, la presente investigación se centra en evaluar de manera comparativa un sistema RAS tradicional y uno modificado durante un periodo experimental de cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*), considerando variables productivas (como crecimiento, conversión alimenticia y supervivencia) y parámetros de calidad del agua (como oxígeno disuelto, temperatura y compuestos nitrogenados). El objetivo es generar evidencia científica que permita determinar si las modificaciones implementadas en los RAS generan mejoras significativas en el desempeño del

cultivo, aportando información valiosa para la toma de decisiones de los productores y para el fortalecimiento de la competitividad y sostenibilidad del sector acuícola.

Los resultados de este estudio tienen el potencial de contribuir al desarrollo de modelos productivos más eficientes y sostenibles, apoyar la implementación de tecnologías innovadoras en el sector y ofrecer una base científica sólida para futuras investigaciones sobre optimización de sistemas RAS en el cultivo de tilapia roja y otras especies de interés comercial.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de un sistema RAS tradicional y uno modificado durante el periodo experimental de cultivo de tilapia roja.

2.2 Objetivos Específicos

Analizar la calidad del agua en ambos sistemas durante el periodo de estudio.

Evaluar el crecimiento, biomasa y mortalidad de la tilapia roja en cada sistema.

Verificar la eficiencia de funcionamiento de ambos sistemas durante el periodo experimental.

3. Marco de Antecedentes

3.1 Antecedentes Internacionales

En la actualidad, la acuicultura ha experimentado un crecimiento impulsado por la necesidad de producir de manera sostenible y eficiente, por ello, los sistemas de recirculación acuícola (RAS, por sus siglas en inglés Recirculating Aquaculture System) han surgido como una alternativa tecnológica innovadora que permite el cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas. Además, estos sistemas se caracterizan por la reutilización continua del agua por medio del proceso de filtración mecánica, biológica y química, lo que facilita el mantenimiento de parámetros óptimos de calidad del agua y reduce considerablemente el consumo hídrico y por ende el impacto ambiental. Debido a lo anterior, los RAS han sido ampliamente estudiados y aplicados en diferentes escalas productivas, evidenciando su potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la acuicultura actual (Ahmed & Turchini, 2021). Por ello, es pertinente abordar los antecedentes que permiten comprender la evolución, aplicación y resultados de esta tecnología en distintos contextos.

Martins et al. (2016) desarrollaron un estudio comparativo realizado en Europa basado en análisis experimental y revisión técnica de múltiples sistemas RAS comerciales. Donde la metodología incluyó evaluación de consumo hídrico, eficiencia de biofiltración, concentración de nitrogenados y desempeño productivo a través de distintas configuraciones del sistema. Se concluyó que el biofiltro y la sustracción de sólidos afectan la estabilidad del sistema y en el crecimiento de los peces. Este antecedente soporta la importancia de evaluar variables de calidad del agua y componentes estructurales del sistema al realizar comparaciones entre sistemas.

El-Sayed (2019) a través de su documento realizó un análisis tanto experimental como comparativo sobre sistemas intensivos de cultivo, incluyendo RAS, donde se tuvo presente densidades de siembra, conversión alimenticia, tasa de crecimiento específico (TCE) y supervivencia. Acá La metodología se basó en ensayos controlados bajo diferentes condiciones de manejo y calidad del agua. Se determinó que la estabilidad ambiental influye significativamente en la eficiencia alimenticia y el rendimiento productivo. En este contexto se destacan los sistemas RAS como los más eficientes debido a su capacidad de mantener condiciones fisicoquímicas de manera constante, lo que afecta directamente el desempeño productivo de manera positiva, ya que se reduce el estrés de los peces. Igualmente, documento influye y aporta al estudio actual, ya que respalda la selección de indicadores productivos como variables dependientes en la comparación efectuada entre los sistemas tradicional y modificado.

Hashmi et al. (2025) también efectuaron una revisión sistemática, así como análisis comparativo de los avances tecnológicos implementados en sistemas de recirculación acuícola (RAS) a nivel global, con enfoque principal en la eficiencia productiva y ambiental, para ello la metodología empleada consistió en la recopilación bibliográfica, para aplicar criterios de selección relacionados con desempeño productivo, consumo energético, eficiencia en remoción de sólidos y control de compuestos nitrogenados. Los autores clasificaron los sistemas evaluados en RAS convencionales y RAS con modificaciones tecnológicas, tales como automatización de monitoreo en tiempo real, incorporación de sensores para control de oxígeno disuelto y pH, optimización de biofiltros de lecho móvil (MBBR) y mejoras en dispositivos de separación mecánica de sólidos.

El análisis comparativo evidenció que los sistemas modificados presentaron mayor estabilidad en parámetros fisicoquímicos, mejor eficiencia energética por unidad de biomasa producida y mayores tasas de crecimiento. Asimismo, se reportó reducción en el factor de

conversión alimenticia (FCR) cuando se optimizaban los componentes hidráulicos y biológicos del sistema.

Este antecedente es de vital importancia ya que está relacionado con la hipótesis central de este documento, al mostrar evidencia de que las modificaciones técnicas en sistemas RAS pueden generar mejoras medibles en desempeño productivo.

También es de acotar que Espinal y Matulic (2019) realizaron un análisis técnico de tecnologías RAS aplicadas a sistemas intensivos e integrados de producción acuícola. Que a diferencia de los anteriores antecedentes la metodología se centró en una revisión estructural y funcional de los componentes del sistema: filtración mecánica, biofiltración, sistemas de aireación, control hidráulico y manejo de residuos sólidos, además se realizaron distintas configuraciones de filtración (filtros de tambor, sedimentadores, biofiltros de lecho fijo y lecho móvil), evaluando la remoción de sólidos y la nitrificación bajo diferentes cargas orgánicas. Lo que llevo a la conclusión de que la eficiencia del sistema depende de la correcta cohesión entre filtración mecánica y biológica, lo que reduce la acumulación de materia orgánica, disminuyen fluctuaciones en amonio y nitritos y contribuyen a un ambiente más estable para los peces, igualmente se encontró que una hidráulica idónea permite minimiza zonas muertas y mejora la oxigenación, reduciendo factores de estrés en los organismos cultivados.

Este antecedente sustenta la necesidad de considerar el diseño estructural del sistema como variable. la comparación entre un RAS tradicional y uno modificado implica evaluar cómo cambios en filtración, hidráulica o biofiltración pueden incidir en variables productivas, asimismo, proporciona fundamento técnico para describir detalladamente las diferencias estructurales entre ambos sistemas dentro del capítulo metodológico.

3.2 Antecedentes Nacionales

En el Centro Agroempresarial y Acuícola del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), en Fonseca, La Guajira, se desarrolló una investigación para evaluar el rendimiento productivo de tilapia roja a través de un sistema RAS, que uso un diseño cuantitativo con seguimiento por un periodo de seis meses, realizando mediciones periódicas de temperatura, pH, oxígeno disuelto y amonio, además de otros indicadores productivos como ganancia de peso, biomasa final, supervivencia y factor de conversión alimenticia (FCA). Que al final mostraron resultados de supervivencia superiores al 90 % y un FCA promedio de 1,37, evidenciando eficiencia técnica asociada al control de parámetros fisicoquímicos del agua (Servicio Nacional de Aprendizaje, 2023).

Lo que se relaciona directamente con los objetivos del documento al evaluar el crecimiento, biomasa y mortalidad, al igual que la verificación de la eficiencia de funcionamiento del sistema, que demuestra cómo la estabilidad en la calidad del agua influye en el rendimiento productivo.

Complementando el antecedente anterior la Corporación Universitaria Minuto de Dios desarrolló un estudio de factibilidad técnica para la implementación de sistemas RAS en el cultivo de tilapia roja en los departamentos de Tolima y Huila, que utilizó una metodología de análisis técnico-operativo y evaluación de parámetros de calidad del agua, comparando sistemas tradicionales con sistemas de recirculación, a través de este se concluyó que la adopción de RAS puede reducir hasta en un 90 % el consumo de agua y mejorar el control de variables fisicoquímicas, incrementando la sostenibilidad productiva (Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2022). Este estudio respalda el objetivo de analizar la calidad del agua en ambos sistemas y aporta fundamentos técnicos para evaluar la eficiencia operativa de configuraciones tradicionales y mejoradas.

Asimismo, García Hernández et al. (2023) desarrollaron un modelo de crecimiento de tilapia en sistemas RAS el cuál se instaló en La Guajira, empleando simulación Monte Carlo basada en datos experimentales reales, la metodología empleada se basó en el registro sistemático de temperatura, oxígeno disuelto y compuestos nitrogenados, correlacionándolos con tasas de crecimiento y biomasa. El modelo presentó un coeficiente de determinación elevado ($R^2 \approx 0,97$), lo que evidencia una fuerte relación entre estabilidad en la calidad del agua y desempeño productivo, que aporta un sustento metodológico al objetivo de analizar la calidad del agua y su influencia en el crecimiento y biomasa, reforzando la necesidad de evaluar comparativamente ambos sistemas durante el periodo experimental.

4. Marco Teórico

4.1 Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS)

Los sistemas de recirculación acuícola (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) constituyen una tecnología de producción intensiva que está enfocada en maximizar el control ambiental y minimizar el consumo de recursos mediante la reutilización continua de los mismos. A diferencia de los sistemas extensivos o semiintensivos tradicionales, los RAS operan bajo un principio de circuito cerrado, donde el agua se trata y reincorpora al sistema productivo tras procesos físicos y biológicos especializados (Timmons & Ebeling, 2018).

El énfasis fundamental de los RAS radica en su capacidad para desacoplar la producción acuícola de las limitaciones ambientales externas, permitiendo densidades de cultivo significativamente mayores sin comprometer la calidad del agua. Lo que es particularmente

relevante en contextos donde existe limitaciones sobre el recurso hídrico o restricciones ambientales normativas (FAO, 2022).

Un sistema RAS es una mezcla de procesos que deben resultar funcionales entre ellos hidráulicos, biológicos y energéticos, donde su eficiencia depende de la sincronización entre generación de desechos metabólicos y capacidad de tratamiento del sistema, que constituye un determinante directo del rendimiento productivo.

4.2 Componentes técnicos del sistema RAS

4.2.1 Filtración mecánica: control de sólidos y estabilidad operativa.

Esta es la primera barrera de control dentro del sistema, donde su función es remover sólidos suspendidos totales (SST), los cuales se dan por alimento no consumido y de las excretas metabólicas de los peces.

Esta etapa la acumulación de materia orgánica provoca el aumento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), liberación secundaria de amonio, presencia de compuestos tóxicos derivados de la descomposición anaerobia.

Boyd (2020) señala que si no se tiende a realizar una remoción de sólidos idónea se complica la eficiencia del biofiltro y aumenta la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos, lo que lleva a que, la eficiencia mecánica no solo influye en la claridad del agua, sino que constituye un factor estructural que condiciona el desempeño biológico posterior. En sistemas modificados, el uso de filtros de tambor rotatorio de mayor precisión o separadores centrífugos mejora la retención de partículas finas, reduciendo la carga orgánica que puede llegar a entrar al biofiltro.

4.2.2 Filtración biológica y nitrificación: eje funcional del sistema.

Esta representa el componente más crítico del RAS, dado que permite la transformación del amonio, principal desperdicio metabólico nitrogenado, en compuestos menos tóxicos mediante el proceso de nitrificación.

Este proceso ocurre en dos etapas: oxidación de amonio a nitrito (*Nitrosomonas* spp.) y oxidación de nitrito a nitrato (*Nitrobacter* spp.).

Timmons y Ebeling (2018) establecen que la capacidad de nitrificación se da por el área superficial específica del medio filtrante y del tiempo de retención hidráulica. Malone y Pfeiffer (2015) enfatizan que el diseño del biofiltro determina la tasa máxima de conversión de amonio, lo que afecta la carga biológica que el sistema puede soportar.

Por otro lado, en un RAS modificado, el uso de medios plásticos de alta superficie específica y mejor circulación hidráulica incrementa la eficiencia de colonización bacteriana, reduciendo picos de amonio y nitrito, lo que conlleva mayor estabilidad fisiológica para los peces.

4.2.3 Tanques de Cultivo.

Los tanques de cultivo constituyen un componente fundamental dentro de los sistemas de recirculación acuícola (RAS), ya que proporcionan el espacio donde se desarrollan los peces y donde ocurren los procesos de alimentación, crecimiento y producción de biomasa. El diseño de los tanques debe considerar la especie cultivada, la densidad de siembra y la dinámica del flujo de agua, debido a que estos factores afectan en la calidad del agua, la acumulación de residuos y el bienestar de los organismos (Timmons & Ebeling, 2018).

En los sistemas acuícolas intensivos se utilizan diferentes tipos de tanques que varían de forma entre estos se encuentran circulares, rectangulares y cuadrados. Pero existe la decantación específica por los tanques circulares para el sistema RAS, debido a que permiten una circulación

hidráulica más eficiente, favoreciendo el movimiento constante del agua y la concentración de sólidos hacia el drenaje central. Esto facilita la eliminación de desechos orgánicos y reduce la formación de zonas con baja concentración de oxígeno disuelto (Badiola et al., 2018).

Asimismo, el flujo continuo del agua dentro de los tanques circulares contribuye a mantener una distribución más uniforme del oxígeno y de los nutrientes, lo que favorece el crecimiento y reduce el estrés en los peces. Por esta razón, el diseño adecuado de los tanques se considera un elemento clave para mejorar la eficiencia operativa y el rendimiento productivo en sistemas de recirculación acuícola (Davidson et al., 2016).

4.2.4 Biofiltro.

Este permite eliminar compuestos nitrogenados tóxicos generados por el metabolismo de los peces, la función para la que fue diseñado es proporcionar una superficie donde se desarrollan bacterias nitrificantes responsables de transformar el amoníaco en compuestos menos tóxicos, manteniendo así la calidad del agua del sistema (Liu et al., 2021).

En estos sistemas, los peces liberan amoníaco (NH_3) como producto de excreción metabólica, compuesto que resulta altamente tóxico incluso a bajas concentraciones, por lo que debe ser eliminado o transformado rápidamente. En el biofiltro, bacterias nitrificantes como Nitrosomonas oxidan el amoníaco a nitrito (NO_2^-) y posteriormente bacterias como Nitrobacter convierten el nitrito en nitrato (NO_3^-), un compuesto mucho menos letal para los peces. Este proceso biológico se conoce como nitrificación y ocurre en condiciones aeróbicas, requiriendo oxígeno disuelto para su funcionamiento (MDPI, 2022; Cavendish International, 2020).

El rendimiento del biofiltro depende principalmente del material filtrante, el cual debe proporcionar una gran superficie específica para la colonización bacteriana. Materiales como plásticos estructurados, cerámica o roca volcánica permiten que se forme una biopelícula

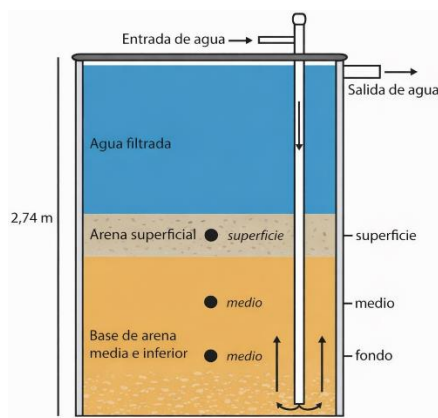
bacteriana encargada de llevar a cabo los procesos de transformación del nitrógeno, a mayor superficie disponible para el crecimiento bacteriano, se incrementara la capacidad del sistema para eliminar amoníaco y mantener condiciones estables de calidad del agua (MDPI, 2022).

En los sistemas RAS modernos, el uso adecuado de biofiltros permite mantener concentraciones bajas de amoníaco y nitrito, lo que contribuye a mejorar el crecimiento, la supervivencia y el bienestar de los peces cultivados. Por esta razón, los biofiltros se consideran el núcleo del tratamiento biológico del agua en sistemas acuícolas intensivos (Liu et al., 2021).

En la Figura 1 se puede observar el esquema general de un biofiltro, donde se señalan sus principales componentes y las capas que permiten el desarrollo de bacterias nitrificantes responsables de la transformación de compuestos nitrogenados, mostrando así su papel fundamental dentro del sistema de recirculación.

Figura 1.

Esquema de biofiltro sumergido



Nota. El agua ingresa al biofiltro desde la parte superior y atraviesa el medio filtrante compuesto por capas de arena, donde se desarrolla una biopelícula de bacterias nitrificantes encargadas de transformar el amoníaco en nitrito y posteriormente en nitrato. Este proceso

biológico permite mejorar la calidad del agua antes de que esta retorne al sistema de cultivo.

Adaptado de Bartelme et al. (2017).

4.3 Fundamentos de la Nitrificación

4.3.1 El ciclo del nitrógeno.

El nitrógeno constituye uno de los elementos bioquímicos importantes para el funcionamiento de los sistemas biológicos, porque ayuda a parte integral de proteínas, ácidos nucleicos, enzimas y otras moléculas esenciales para el crecimiento y el metabolismo celular. Aunque el nitrógeno molecular (N_2) representa aproximadamente el 78 % de la atmósfera terrestre, esta forma gaseosa es poco reactiva y no puede ser utilizada directamente por la mayoría de los seres vivos (Boyd, 2020).

La incorporación de nitrógeno a la biomasa biológica requiere su transformación en formas químicas más accesibles, este cambio se inicia con la fijación del nitrógeno, un proceso llevado a cabo por determinados microorganismos procariotas que convierten el N_2 en amonio (NH_4^+), un compuesto asimilable (Gruber & Galloway, 2018). Posteriormente, en presencia de oxígeno, el amonio puede ser convertido en nitrito (NO_2^-) y luego en nitrato (NO_3^-) mediante un proceso denominado nitrificación, el cual es mediado por comunidades bacterianas especializadas (Prosser & Nicol, 2018).

En los sistemas acuáticos naturales, especialmente aquellos con características oligotróficas, que se traduce a baja disponibilidad de nutrientes la cantidad de nitrógeno inorgánico disponible puede limitar el crecimiento de los organismos. En estos ambientes, las plantas acuáticas, algas y microbios compiten intensamente por formas de nitrógeno asimilables, lo que condiciona la productividad de todo el ecosistema (FAO, 2022).

En los sistemas de recirculación acuícola (RAS), el ciclo del nitrógeno adquiere una función central debido a la alta densidad de cultivo. Los peces excretan amonio como producto de su metabolismo y de la degradación del alimento no consumido, lo que puede generar acumulación de compuestos nitrogenados tóxicos si no se manejan adecuadamente (Boyd, 2020).

En los RAS, la biofiltración es clave, dado que los biofiltros poseen poblaciones de bacterias nitrificantes que transforman el amonio en nitrito y, finalmente, en nitrato, minimizando la toxicidad del medio acuático (Timmons & Ebeling, 2018). La eficiencia de este proceso depende de factores como la temperatura, el nivel de oxígeno disuelto, el pH y la superficie específica del medio filtrante, lo que hace que el diseño y manejo de los biofiltros sea vital para el rendimiento de los sistemas acuícolas (Huang et al., 2021). En la Figura 2 se evidencia el ciclo del nitrógeno en sistemas acuáticos, donde se representan los procesos de transformación del amoníaco (NH_3) en nitrito (NO_2^-) por acción de bacterias del género *Nitrosomonas*, y posteriormente en nitrato (NO_3^-) por bacterias como *Nitrobacter*, así como otros procesos como la fijación y asimilación del nitrógeno, mostrando la importancia de la biofiltración en el control de compuestos nitrogenados dentro de los sistemas RAS.

Finalmente, es importante destacar que la acumulación de nitratos también puede tener efectos adversos si supera ciertos umbrales; un ejemplo, son las concentraciones elevadas de NO_3^- que pueden contribuir a la eutrofización del agua y afectar la calidad fisiológica de los peces, especialmente en cultivos intensivos que dependen de recirculación continua (FAO, 2022)

se produce a partir del catabolismo de proteínas contenidas en el alimento y se libera al medio acuático a través de las branquias y en menor medida mediante la descomposición de materia orgánica, como restos de alimento y excretas. En cultivos intensivos, la acumulación de amoníaco puede alcanzar niveles potencialmente tóxicos si no se controla mediante procesos biológicos de nitrificación en biofiltros (Basiuny et al., 2023).

En el medio acuático, el amoníaco se encuentra en equilibrio químico entre dos formas: amoníaco no ionizado (NH_3) y amonio ionizado (NH_4^+). La suma de ambas formas se conoce como nitrógeno amoniaco total (TAN), la proporción entre estas dos especies depende principalmente del pH, la temperatura y la salinidad del agua. A medida que el pH y la temperatura aumentan, se incrementa la fracción de amoníaco no ionizado (NH_3), el cual es considerado tóxico para los peces debido a su capacidad de atravesar fácilmente las membranas celulares y alterar procesos fisiológicos esenciales (Xu et al., 2021; Yan et al., 2021).

Algunas investigaciones han demostrado que concentraciones elevadas de amoníaco pueden provocar efectos adversos significativos en los organismos acuáticos, dentro de las cuales se encuentran alteraciones fisiológicas, daño en los tejidos branquiales, reducción del crecimiento, alteraciones metabólicas y debilitamiento del sistema inmunológico, además, la exposición a niveles excesivos de amoníaco puede generar estrés fisiológico crónico y generar susceptibilidad a enfermedades, lo que influye en el rendimiento productivo de los sistemas acuícolas (Shin et al., 2016; Xu et al., 2021).

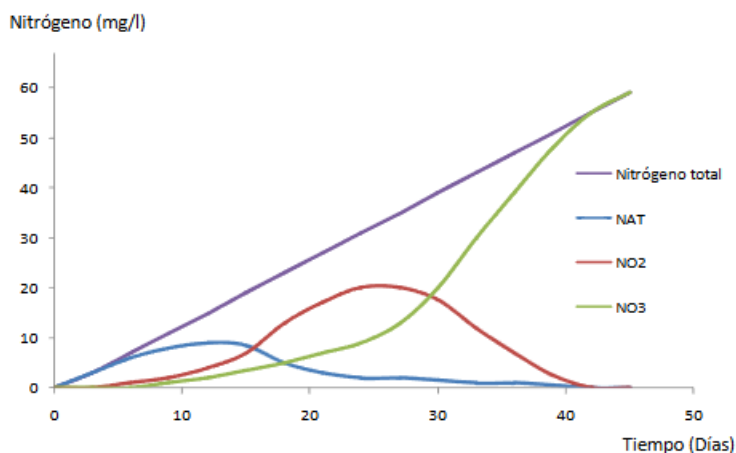
En el caso específico de la tilapia (*Oreochromis niloticus*), especie cultivada debido a su capacidad de adaptación y rápido crecimiento, se ha evidenciado que la exposición a altas concentraciones de amoníaco afecta directamente su desarrollo y supervivencia, estudios experimentales en sistemas de recirculación han demostrado que concentraciones superiores a 0,89

mg/L de amoníaco no ionizado pueden comprimir el crecimiento y ampliar la mortalidad en juveniles, principalmente cuando se trata con altas densidades de cultivo (Sánchez-Ortiz et al., 2022).

Por esta razón, el manejo adecuado de la calidad del agua en sistemas RAS requiere la implementación de biofiltros nitrificantes, los cuales permiten transformar el amoníaco en compuestos menos tóxicos. En este proceso, bacterias nitrificantes como Nitrosomonas oxidan el amoníaco a nitrito (NO_2^-), mientras que bacterias del género Nitrobacter convierten posteriormente el nitrito en nitrato (NO_3^-), compuesto que presenta una toxicidad considerablemente menor para los peces (van der Meeren & Mangor-Jensen, 2020). En la Figura 3 se presenta la variación temporal del nitrógeno total, nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), donde se evidencia el comportamiento dinámico de estos compuestos durante el proceso de nitrificación.

Figura 3.

Proceso de nitrificación



Nota. La nitrificación del biofiltro en sistemas RAS involucra cambios en compuestos nitrogenados en las primeras semanas. Tomado de Candarle, 2015.

En el mismo ámbito es necesario acotar que una nitrificación incompleta provoca acumulación de nitritos en lugar de nitratos, lo que genera estrés y reduce el crecimiento, pudiendo causar además la “enfermedad de la sangre marrón”, una afección derivada de la formación de metahemoglobina en el torrente sanguíneo. Asimismo, en sistemas acuapónicos, la acumulación de nitritos afecta a las plantas al limitar los nutrientes esenciales necesarios para su desarrollo, desestabilizando el equilibrio del sistema. (Candarle, 2015, pág. 13).

La toxicidad de los nitratos para los peces se presenta únicamente en concentraciones superiores a 300-500 ppm. Estas condiciones pueden evitarse fácilmente manteniendo una densidad adecuada de plantas en el sistema, las cuales utilizan los nitratos como fuente de nutrientes. Las bacterias juegan un papel esencial en el equilibrio del ecosistema acuático, ya que transforman el amoníaco, un compuesto tóxico para los peces, en nitratos a través de procesos biológicos. Este nitrato se convierte en el nutriente más accesible y aprovechable para las plantas, a pesar de que también pueden asimilar otros compuestos nitrogenados. Este balance entre organismos y compuestos garantiza una mejor calidad del agua y un entorno saludable.). (Candarle, 2015, pág. 14)

4.5 Diferencias estructurales y funcionales entre RAS tradicional y modificado

Un sistema tradicional y uno modificado no se limita a la incorporación de equipos adicionales, sino que implica una optimización integral del diseño hidráulico, biológico y operativo.

Un RAS tradicional suele presentar diseño hidráulico estándar, control manual de parámetros y biofiltros convencionales. Por otro lado, un RAS modificado incorpora monitoreo

automatizado continuo, optimización de flujos y reducción de zonas muertas, biofiltros de mayor eficiencia y mejoras en eficiencia energética. Badiola et al. (2018) expresan que las mejoras tecnológicas tratan de eliminar fluctuaciones críticas en la calidad del agua, mejoran la eficiencia y aumentan la productividad, manteniendo una estabilidad ambiental que reduce el estrés metabólico, lo cual se traduce en mejor conversión alimenticia y crecimiento.

Por tanto, la comparación entre ambos sistemas debe enfocarse en variables técnicas (estabilidad, eficiencia hidráulica, nitrificación) y productivas (biomasa, crecimiento, mortalidad).

4.5.1 Tilapia roja (*Oreochromis sp.*) como modelo productivo.

La tilapia roja es una especie híbrida del género *Oreochromis*, ampliamente cultivada debido a su rápido crecimiento, resistencia a variaciones ambientales y alta aceptación comercial (FAO, 2022). En Colombia, es uno de los principales productos acuícolas a nivel nacional (AUNAP, 2023).

El énfasis biológico radica en que, aunque la tilapia es resistente, su desempeño óptimo depende de mantener una temperatura estable (26–30 °C), oxígeno superior a 5 mg/Lm, baja concentración de amonio no ionizado, dado que si no se logra el estrés crónico derivado de inestabilidad ambiental reduce la eficiencia alimenticia y aumenta la susceptibilidad a enfermedades (Boyd, 2020).

En el mismo ámbito en el desarrollo productivo, el ciclo de cultivo, se divide en fases definidas. Durante la primera etapa que corresponde al alevinaje, estos individuos pueden alcanzar pesos entre 20 g y 50 g en un periodo de 6 a 8 semanas, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de oxigenación mayor que 5 mg/L, pH entre 6,5–8,5 y disponibilidad de alimento con niveles proteicos correspondientes a la etapa fisiológica. Una vez acaba este primer momento, en la fase de pre-engorde y engorde, los peces presentan tasas de crecimiento específicas elevadas,

con incrementos diarios que oscilan entre 1,5 y 3,5 g/día, lo que permite alcanzar pesos comerciales entre 300 y 600 g en un lapso de 4 a 7 meses. En sistemas controlados, como lo son los RAS, estos tiempos pueden optimizarse debido a la estabilidad (FAO, 2022).

Otro aspecto fundamental en la producción de estos peces es la eficiencia en la conversión alimenticia, ya que representa el pilar de los costos operativos en acuicultura. En condiciones óptimas, se pueden alcanzar factores de conversión alimenticia (FCA) entre 1,2 y 1,8, lo cual indica una alta eficiencia en la transformación del alimento en biomasa. No obstante, este parámetro está condicionado por la calidad del agua, puesto que la acumulación de compuestos nitrogenados, especialmente el amoníaco no ionizado (NH_3), puede afectar negativamente la tasa de ingestión, el metabolismo energético y la asimilación de nutrientes. Concentraciones altas de NH_3 llevan a alteraciones fisiológicas como daño branquial, desequilibrios osmóticos y estrés metabólico, lo que da paso a una disminución del crecimiento y un aumento en la mortalidad.

En este contexto, los sistemas RAS ofrecen ventajas significativas al permitir el control continuo de los parámetros fisicoquímicos del agua, tales como el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y los compuestos nitrogenados, al implementar biofiltros eficientes mejora la nitrificación del amoníaco a nitrito (NO_2^-) y posteriormente a nitrato (NO_3^-), reduciendo la toxicidad del medio y favoreciendo un ambiente más estable, que mejora el crecimiento, incrementa la supervivencia, fortalece la respuesta inmunológica y promueve una mayor uniformidad en los lotes (El-Sayed, 2019; FAO, 2022).

Igualmente, la densidad de siembra es un factor en el rendimiento productivo, en sistemas tradicionales, las densidades suelen ser moderadas; pero, en sistemas RAS pueden incrementarse, alcanzando valores superiores entre 40 y 60 kg/m^3 , siempre con una oxigenación y eficiencia en la eliminación de desechos. Asimismo, es necesario acotar, que densidades excesivas pueden

lograr competencia por el alimento, incremento del estrés y deterioro de la calidad del agua, lo que afecta el eje productivo.

En conjunto, las características biológicas y productivas, así como la capacidad de los sistemas RAS para mantenerse estables y controlados, lo consolidan como una de las mejores opciones para la producción acuícola intensiva. Su rápido crecimiento, alta eficiencia alimenticia y tolerancia a condiciones variables logran aumentar la productividad, reducir los tiempos de cultivo y optimizar el uso de recursos.

5. Metodología

5.1 Área de Investigación: Población y Muestra

En cuanto a la población de estudio, se definió en dos niveles. En primera medida, se consideraron como población los sistemas de recirculación acuícola (RAS) implementados, que se dividieron en dos unidades experimentales: un sistema RAS tradicional y un sistema RAS modificado. Debido a que se trabajó con la totalidad de los sistemas, la muestra coincidió con la población, realizándose evaluaciones comparativas entre ambos. En estos se midieron variables relacionadas con la calidad del agua, tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto y compuestos nitrogenados, con el fin de analizar su comportamiento y estabilidad durante el periodo experimental.

Asimismo, se estableció como población biológica a los individuos del género *Oreochromis* sp., que fueron sembrados en ambos sistemas, la muestra estuvo conformada por la totalidad de los peces presentes en cada unidad experimental 64 (RAS tradicional) y 78 (RAS modificado), sobre los cuales se evaluaron parámetros productivos como peso, biomasa, tasa de crecimiento, conversión alimenticia y supervivencia, esta doble definición de población efectuada

permitió abordar el estudio desde un enfoque complementario, relacionando las condiciones del sistema (calidad del agua) con la respuesta biológica.

5.2 Tipo y Diseño de la Investigación

La investigación se definió como de tipo experimental con enfoque cuantitativo, orientada a la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con variables productivas y parámetros fisicoquímicos del agua en el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). Este enfoque permitió evaluar objetivamente el desempeño técnico y productivo de los sistemas de recirculación acuícola (RAS) bajo condiciones controladas y estables.

Este estudio se efectuó mediante un diseño experimental comparativo, cuyo propósito fue analizar las diferencias en el rendimiento entre dos configuraciones de sistemas RAS: un sistema tradicional y un sistema modificado con diseño tipo DHS, aplicados en la fase de levante de tilapia roja.

El diseño experimental se estructuró a partir de dos tratamientos, que se diferenciaron por la tecnología y configuración del sistema de filtración:

Tratamiento 1: RAS tradicional, que estuvo conformado por un sistema de filtración convencional conformado por dos unidades: un filtro mecánico, elaborado con guata para la retención de sólidos suspendidos, y un filtro biológico, acondicionado con piedra pómez (5 kg) como medio de soporte para el crecimiento de bacterias nitrificantes encargadas de la transformación de compuestos nitrogenados.

Tratamiento 2: RAS modificado tipo DHS, el cual incorporó modificaciones estructurales en el sistema de filtración. Este sistema estuvo conformado por tres unidades de filtración: un filtro mecánico con guata, un filtro biológico con medio K1 (4 kg) y un filtro adicional que operó bajo un diseño de flujo descendente mediante canastillas plásticas perforadas. Esta configuración

permitió mejorar la oxigenación del agua y aumentar la eficiencia en la remoción de sólidos y compuestos nitrogenados, diferenciándose del sistema tradicional tanto en el número de etapas de filtración como en el tipo de medio filtrante y dinámica hidráulica.

Ambos se operaron bajo condiciones similares de volumen, aireación, alimentación y manejo, para garantizar la comparabilidad de los resultados y atribuir las diferencias observadas exclusivamente a la configuración del sistema.

Debido a limitaciones de espacio y recursos económicos, se trabajó con una unidad experimental por tratamiento, realizando un análisis comparativo directo entre ambas configuraciones.

5.3 Diseño de los sistemas de recirculación acuícola (RAS)

Durante la fase inicial del estudio, los sistemas de recirculación acuícola fueron diseñados e instalados el día 15 de agosto, previa adecuación del área de trabajo y de la red eléctrica necesaria para el funcionamiento de las bombas de agua y del blower de la aireación.

Para la construcción de los dos sistemas se utilizaron bebederos plásticos con capacidad de 500 litros como estanques de cultivo y canecas plásticas de 200 litros destinadas a la elaboración de los filtros. Se hizo uso de una tubería de una pulgada para la conducción del agua impulsada y tubería de tres pulgadas para mejorar el flujo por gravedad entre los estanques y los filtros.

El sistema RAS tradicional fue construido con dos unidades de filtración un filtro mecánico con guata que buscaba la retención de sólidos suspendidos y un filtro biológico con piedra pómez (5 kg) como medio para el desarrollo de bacterias nitrificantes.

Por su parte, el sistema RAS modificado tipo DHS fue diseñado con tres unidades de filtración un filtro mecánico con guata, un filtro biológico con medio K1 (4 kg) y un filtro adicional

con diseño de flujo descendente mediante canastillas plásticas perforadas, lo cual permitió mejorar la oxigenación y la eficiencia en la remoción de sólidos y compuestos nitrogenados.

Las conexiones se realizaron mediante perforaciones en los estanques y canecas, utilizando empaques de sellado para no tener fugas. Los componentes fueron dispuestos en forma descendente, permitiendo la circulación del agua por gravedad hasta el compartimiento de recirculación, donde una bomba retornaba el agua al sistema, finalizando el ciclo.

Después, estos fueron sometidos a pruebas de funcionamiento durante cinco días para verificar la recirculación, detectar fugas y corregir posibles fallas. Una vez estabilizados, se llevó a cabo el proceso de maduración del agua para favorecer el establecimiento de bacterias en el filtro biológico.

5.4 Manejo del cultivo, siembra y alimentación

Una vez finalizada la instalación, el proceso de maduración del agua inició el 2 de septiembre de 2025, utilizando agua proveniente de una fuente natural en este caso un río, la cual presentaba compuestos nitrogenados que favorecieron al proceso biológico. En este periodo, los sistemas operaron de manera continua con recirculación y aireación constante.

Para estimular la nitrificación, se agregaron pequeñas cantidades diarias de concentrado comercial con 45% de proteína, generando amonio y promoviendo el crecimiento bacteriano. Se realizaron mediciones periódicas de pH, amonio, nitrito y nitrato con una frecuencia aproximada de día por medio.

El proceso de maduración tuvo una duración de alrededor siete días, evidenciándose la disminución del amonio y la estabilización de los parámetros del agua. No obstante, la siembra se realizó posteriormente debido a recomendaciones del tutor y a la demora en la adquisición de los alevines. Cada sistema presentó un volumen total aproximado de 900 litros, considerando los

estanques y los compartimientos de filtración. La densidad de siembra fue establecida con base en criterios técnicos para sistemas RAS.

Los peces fueron adquiridos en la plaza de mercado del municipio de Málaga (Santander). Durante el transporte se presentaron dificultades que afectaron el oxígeno en las bolsas, lo cual pudo influir en la condición inicial de los organismos y la mortalidad presente inicialmente en los mismos.

La siembra se realizó el 25 de octubre de 2025 en horas de la noche, previa aclimatación durante aproximadamente una hora. Inicialmente se introdujeron 75 alevines en cada sistema; sin embargo, se registró mortalidad temprana, perdiéndose siete peces en el sistema tradicional y uno en el sistema modificado tipo DHS. Por tanto, la población experimental quedó conformada por 68 y 74 peces, respectivamente.

El primer muestreo biométrico se realizó el 25 de noviembre de 2025, debido al reducido tamaño inicial de los organismos. Posteriormente, los muestreos se efectuaron mensualmente, aumentando la frecuencia a semanal durante el último mes.

La alimentación se suministró diariamente con el mismo concentrado y en iguales condiciones para ambos sistemas, ajustando la ración según el crecimiento, estos datos fueron registrados en formatos de campo y procesados en hojas de cálculo.

El sistema de aireación operó continuamente mediante blower, garantizando niveles adecuados de oxígeno disuelto. Igualmente, se monitorearon periódicamente parámetros como temperatura, pH, oxígeno disuelto y compuestos nitrogenados.

Durante el periodo experimental, los peces muertos fueron retirados oportunamente, registrando cada evento para su análisis. El estudio se desarrolló entre el 25 de octubre de 2025 y el 28 de febrero de 2026, manteniendo condiciones homogéneas entre tratamientos para poder

compararlos. Debido a limitaciones de recursos, se trabajó con una unidad experimental por tratamiento.

5.5 Técnicas e Instrumentos

Se utilizaron técnicas de medición, registro y observación directa para recolectar información relacionada con la calidad del agua, el crecimiento productivo y el funcionamiento de los sistemas de recirculación acuícola (RAS).

Para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del agua, se utilizaron instrumentos de medición directa y kits de análisis colorimétricos. La temperatura del agua (°C) se registró mediante un termómetro digital sumergible, el pH (unidades de pH) y el oxígeno disuelto (mg/L) se midieron utilizando un equipo multiparámetro portátil, los compuestos nitrogenados, incluyendo amonio, nitrito y nitrato (mg/L), se determinaron mediante kits comerciales de análisis de agua.

Durante la fase de maduración del sistema, los parámetros fisicoquímicos (pH, amonio, nitrito y nitrato) se midieron con una frecuencia de día por medio, para verificar la estabilización del sistema. Posteriormente a ello, durante la fase experimental, las mediciones se realizaron de forma periódica, con una frecuencia mínima semanal.

En este contexto en el seguimiento, se llevaron a cabo muestreos biométricos utilizando una balanza digital para determinar el peso promedio en gramos, a partir del cual se calculó la biomasa total gramos en cada sistema. Los muestreos se efectuaron de manera mensual y, durante el último mes del experimento, se incrementaron a una frecuencia semanal.

Por otro lado, la mortalidad se registró por medio de observación directa diaria, contabilizando así el número de individuos muertos en cada sistema. Asimismo, se llevó control

del suministro de alimento, registrando la cantidad diaria suministrada (g/día), el número de raciones y la frecuencia de suministro de alimento.

Adicionalmente, se evaluó el funcionamiento de los sistemas RAS mediante observación directa continua, verificando la recirculación del agua, la aireación, la presencia de fugas y la eficiencia del proceso de filtración en cada sistema, considerando las diferencias estructurales entre el sistema tradicional y el sistema modificado tipo DHS.

Los instrumentos, variables evaluadas, unidades de medida y frecuencias de muestreo se presentan de manera detallada en la Tabla 1, lo que permitió estandarizar el proceso de recolección de datos y garantizar la comparabilidad entre tratamientos.

Tabla 1

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Variable evaluada	Técnica	Instrumento utilizado	Unidad de medida	Frecuencia de medición
Temperatura del agua	Medición directa	Termómetro digital sumergible	°C	Día por medio (maduración) / semanal (fase experimental)
pH	Medición directa	Equipo multiparámetro portátil	Unidades de pH	Día por medio (maduración) / semanal (fase experimental)

Oxígeno disuelto	Medición directa	Equipo multiparámetro portátil	mg/L	Semanal
Amonio (NH₄⁺)	Análisis colorimétrico	Kit comercial de análisis de agua	mg/L	Día por medio (maduración) / semanal (fase experimental)
Nitrito (NO₂⁻)	Análisis colorimétrico	Kit comercial de análisis de agua	mg/L	Día por medio (maduración) / semanal (fase experimental)
Nitrato (NO₃⁻)	Análisis colorimétrico	Kit comercial de análisis de agua	mg/L	Día por medio (maduración) / semanal (fase experimental)
Peso promedio de peces	Muestreo biométrico	Balanza digital	g	Mensual / semanal (último mes)
Biomasa total	Cálculo	Balanza digital + registros	g	Mensual / semanal (último mes)
Mortalidad	Observación directa	Registro manual	Nº / %	Diario

Consumo de alimento	Registro	Formatos de campo	de g/día	Diario
Funcionamiento del sistema	Observación directa	Lista de chequeo	Cualitativo	Diario

5.6 Etapas de la Investigación

5.6.1 Primera Etapa. Implementación y acondicionamiento de los sistemas de recirculación acuícola (RAS).

En la primera etapa de la investigación se realizó la adecuación del área de estudio y la instalación de dos sistemas de recirculación acuícola (RAS), correspondientes a un sistema tradicional y un sistema modificado con diseño tipo DHS, de acuerdo con las especificaciones descritas en el apartado anterior.

Previo a la puesta en funcionamiento, se llevó a cabo la instalación de la red eléctrica necesaria para el funcionamiento de las bombas de recirculación y el sistema de aireación mediante blower, para mantener condiciones operativas continuas en los sistemas. Posteriormente, los sistemas se sometieron a una prueba de funcionamiento durante cinco días, con el fin de verificar la recirculación del agua, detectar posibles fugas y asegurar la estabilidad hidráulica.

Una vez corroborado el correcto funcionamiento, se establecieron condiciones iniciales de manejo similares para ambos sistemas, con el propósito de garantizar la comparabilidad de los resultados experimentales. Estas incluyeron el mismo volumen de agua aproximadamente 900 litros por sistema, el uso de la misma fuente hídrica en este caso agua de río, operación continua del sistema de recirculación y aireación, así como condiciones equivalentes durante el proceso de maduración.

Durante el acondicionamiento, se llevó a cabo la maduración del agua para favorecer el establecimiento de bacterias nitrificantes en los filtros biológicos, mediante la adición controlada de alimento balanceado como fuente de amonio y el monitoreo periódico de los parámetros fisicoquímicos.

Las condiciones iniciales del sistema se estandarizaron cuando los parámetros de calidad del agua se encontraron dentro de los rangos presentados en la Tabla 2, garantizando condiciones idóneas para el cultivo.

Tabla 2

Rangos mínimos estables de calidad del agua en los sistemas RAS

Parámetro	Unidad	Valor mínimo estable	Valor máximo permisible
Temperatura	°C	26	30
pH	—	6,5	8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 5,0	—
Amonio (NH₄⁺)	mg/L	—	≤ 0,5
Nitrito (NO₂⁻)	mg/L	—	≤ 0,5
Nitrato (NO₃⁻)	mg/L	—	≤ 50

En el mismo ámbito, es necesario aclarar que el proceso de maduración tuvo una duración aproximada de siete días, periodo en el cual se mostró la disminución de los niveles de amonio y la estabilización de los compuestos nitrogenados, indicando el adecuado funcionamiento del filtro biológico, tan pronto como fueron alcanzadas estas condiciones, los sistemas se consideraron aptos

para la siembra, garantizando que las diferencias en los resultados productivos se atribuyeran a la configuración de cada uno de los sistemas.

5.6.2 Segunda Etapa. Analizar la calidad del agua en ambos sistemas durante el periodo de estudio.

Efectuar el monitoreo periódico de los parámetros fisicoquímicos del agua en los dos sistemas, tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto y compuestos nitrogenados. Registrar los datos obtenidos en hojas de cálculo en Microsoft Excel, con el fin de evaluar el comportamiento de la calidad del agua durante el periodo experimental.

5.6.3 Tercera Etapa. Conocer el crecimiento, biomasa y mortalidad de la tilapia roja en los dos sistemas.

Así como Realizar mediciones biométricas periódicas de los organismos cultivados para determinar variables productivas como peso, longitud, crecimiento, biomasa acumulada y mortalidad. Registrar la información obtenida en Excel, permitiendo hacer seguimiento al desempeño en cada sistema.

5.6.4 Cuarta Etapa. Analizar y comparar los resultados obtenidos.

Establecer una comparativa entre la información recolectada en Microsoft Excel, para conocer qué resultados relacionados con la calidad del agua, el crecimiento de los peces y la eficiencia de los sistemas, tienen mejor desempeño técnico y productivo de cada configuración de recirculación acuícola.

5.7 Análisis de datos

Organizar la información recolectada durante el periodo experimental mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, estableciendo los registros diarios.

Además de calcular indicadores productivos como crecimiento, biomasa y mortalidad de los organismos cultivados, permitiendo evaluar el desempeño productivo en cada uno de los sistemas, posteriormente analizar los parámetros fisicoquímicos del agua registrados durante el periodo de estudio, tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto y compuestos nitrogenados, con el propósito de identificar variaciones en la calidad del agua los dos sistemas RAS y finalmente presentar y comparar los resultados obtenidos mediante tablas y gráficos elaborados en Microsoft Excel, los cuales permitirán visualizar el comportamiento de las variables evaluadas a lo largo del periodo experimental, los cuales facilitarán la interpretación de los datos y la identificación de discrepancias en el desempeño entre el sistema RAS tradicional y el sistema RAS modificado DSH.

5.8 Costos

Los costos financieros para la implementación del sistema de recirculación acuícola (RAS) ascendieron alrededor de \$5.123.000, valor que incluyó la inversión en equipos, materiales de filtración, infraestructura, instrumentación y componente biológico. Los mayores rubros correspondieron a los tanques de almacenamiento, sistema de aireación y bombas de agua, debido a su relevancia operativa dentro del sistema. Asimismo, se contemplaron costos asociados al monitoreo de parámetros fisicoquímicos, conexiones hidráulicas, sistema eléctrico y herramientas de seguimiento productivo, consolidando la inversión total requerida para la puesta en marcha del sistema.

Tabla 3

Costo de implementación de los sistemas RAS

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Costo total
2	Bombas de agua	338,000	676,000
2	Tanques de 500 litros	450,000	900,000
1	Bacterias nitrificantes	125,000	125,000
142	Alevines	300,000	42,000
	Tuberías	98,000	98,000
4	Caneca para el filtro	110,000	440,000
2	Medidores de los parámetros físico-químicos	272,000	544,000
1	Medidor de pH	150,000	150,000
1	Medidor de oxígeno	253,000	253,000
6	Canastillas	20,000	120,000
4 kg	K1	75,000	300,000
	Espuma filtrante	330,000	330,000
5 kg	Piedra pómez	75,000	75,000
1	Blower aireador de turbina	697,000	697,000

	Empaque, codos, para tubería	100,000	100,000
	Cable de luz, cajas y tomas	150,000	150,000
1	Gramera	50,000	50,000
Total			5.123.000

El costo de alimentación se estimó a partir de la cantidad de alimento suministrado Tablas 4 y 5 y su precio por kilogramo, calculado como el producto entre los kg consumidos y el valor unitario.

Tabla 4

Consumo en Kg del sistema tradicional

Periodo	g/día	Días	Consumo (kg)
25 nov – 25 dic	27,455	30	0,824
25 dic – 25 ene	52,955	31	1,642
25 ene – 12 feb	101,475	18	1,827
12 feb – 19 feb	118,714	7	0,831
19 feb – 26 feb	174,9	7	1,224

Tabla 5

Consumo en Kg del sistema modificado tipo DHS

Periodo	g/día	Días	Consumo (kg)
25 nov – 25 dic	35,445	30	1,063
25 dic – 25 ene	89,76	31	2,783
25 ene – 12 feb	169	18	3,042
12 feb – 19 feb	234,006	7	1,638
19 feb – 26 feb	206,745	7	1,447

Tabla 6

Costo de alimentación de cada sistema.

Sistema	Consumo total (kg)	Costo (COP)	total
RAS tradicional	6,35	32.859	
RAS DHS	9,97	51.766	
TOTAL	16,32	84.625	

Asimismo, se presentan los costos estimados de energía, los cuales se mantienen aproximadamente en 355.390 pesos colombianos para cada uno de los sistemas evaluados.

6. Resultados

6.1 Primera Etapa. Implementar y acondicionar los sistemas de recirculación acuícola (RAS)

En la primera etapa del estudio, posterior a la implementación y acondicionamiento de los sistemas de recirculación acuícola (RAS), se realizó el proceso de siembra de los alevinos de tilapia roja

(*Oreochromis* sp.) en los sistemas experimentales. Para ello, se registró el número total de peces sembrados y el peso promedio individual, temperatura, oxígeno disuelto, pH y observaciones. De igual modo, en la figura 4 se evidencia el proceso de acondicionamiento inicial de los sistemas, el cual permitió establecer las condiciones fisicoquímicas y biológicas necesarias para el adecuado desarrollo del cultivo y la posterior etapa de maduración del biofiltro.

Figura 4.

Proceso de acondicionamiento inicial de los sistemas RAS previo a la etapa de maduración biológica



Donde más adelante permitió fijar las condiciones iniciales de cultivo en el sistema RAS tradicional y en el sistema RAS modificado con diseño DSH, garantizando que ambos iniciaran el experimento bajo condiciones casi totalmente equivalentes, lo cual resulta fundamental para la comparación del desempeño técnico y productivo de los dos sistemas durante el periodo experimental. Siguiendo la misma línea, en la Figura 5 se presenta el montaje final de los dos RAS,

evidenciando así disposición estratégica de los estanques, filtros y conexiones hidráulicas implementadas en cada una de las configuraciones.

Figura 5.

Montaje final de los sistemas de recirculación acuícola (RAS) tradicional y modificado tipo DHS.



Se observa la disposición estructural de los componentes de ambos sistemas, incluyendo estanques de cultivo, tuberías y sistema, que permitieron el funcionamiento continuo y el desarrollo del experimento bajo condiciones controladas.

Por otro lado, es necesario acotar que los datos de la siembra se llevaron mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel, donde se consignó la información correspondiente al número de individuos, peso promedio y otros datos permitiendo llevar un control inicial del cultivo y facilitar el seguimiento de las variables productivas durante el desarrollo de la investigación, estos se presentan a continuación en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7*Caracterización inicial del sistema RAS tradicional*

Categoría	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Datos del lote	Fecha de siembra	—	25/10/2025	Hora: 11:30
	Especie	—	<i>Oreochromis</i> <i>sp.</i>	Tilapia roja
	Número de individuos	Nº	68	Después de mortalidad inicial
	Peso promedio	g	< 1 g	No se pesó por estrés inicial
	Biomasa inicial	g	< 68 g	Estimación (no medición directa)
	Procedencia	—	—	Proveedor local (Málaga)
Condición sanitaria	Estado general	—	Regular	Estrés por transporte
	Mortalidad inicial	Nº	7	Asociada a hipoxia
Parámetros físicos	Temperatura	°C	25,7 – 26,4	Dentro de rango aceptable
	pH	—	8,2 – 8,4	Ligeramente alcalino
	Oxígeno disuelto	mg/L	7,1	Adecuado (>5 mg/L)
	Saturación de oxígeno	%	81,3	—
	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L	0	Sistema estabilizado

Parámetros	Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg/L	0	—
químicos	Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	0	—
Observaciones	Transporte	—	—	Retraso en vía generó disminución de oxígeno
	Adaptación	—	—	Estrés inicial en los organismos

Tabla 8

Caracterización inicial del sistema RAS modificado tipo DHS.

Categoría	Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Datos del lote	Fecha de siembra	—	25/10/2025	—
	Especie	—	<i>Oreochromis</i> sp.	Tilapia roja
	Número de individuos	N°	74	Después de mortalidad inicial
	Peso promedio	g	< 1 g	No se pesó por estrés inicial
	Biomasa inicial	g	< 74 g	Estimación estimada
	Procedencia	—	—	Proveedor local (Málaga)
Condición sanitaria	Estado general	—	Regular	Estrés por transporte

	Mortalidad inicial	N°	1	Baja mortalidad
Parámetros físicos	Temperatura	°C	26,4	Dentro del rango aceptable
	pH	—	8,6	Ligeramente alcalino
	Oxígeno disuelto	mg/L	7,0	Adecuado (>5 mg/L)
	Saturación de oxígeno	%	87	Valor estimado a partir de OD y temperatura
Parámetros químicos	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L	0	Sistema estabilizado
	Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg/L	0	—
	Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	0	—
	Alcalinidad (CaCO ₃)	mg/L	8,4	Baja capacidad tampón
Observaciones	Transporte	—	—	Retrasos en vía Curoso-Málaga afectaron oxígeno
	Adaptación	—	—	Estrés inicial en los organismos

6.2 Segunda Etapa. Analizar la calidad del agua en ambos sistemas durante el periodo de estudio.

Antes del seguimiento de la calidad del agua, se dispuso de los instrumentos necesarios para la medición de los parámetros fisicoquímicos en los RAS, como se evidencia en la Figura 6, Estos instrumentos se utilizaron para realizar el monitoreo periódico de variables como

temperatura, pH, oxígeno disuelto, amonio, nitrito y nitrato, garantizando la confiabilidad de los datos obtenidos durante el periodo experimental.

Figura 6.

Instrumentos utilizados para el monitoreo de la calidad del agua en los sistemas RAS



Igualmente, con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua durante el periodo experimental de los sistemas RAS, se realizó el registro y análisis de variables como pH, amoníaco, nitrito y nitrato en los dos sistemas de recirculación acuícola evaluados como se muestra en la figura 7.

Figura 7.

Registro de información para su posterior análisis.



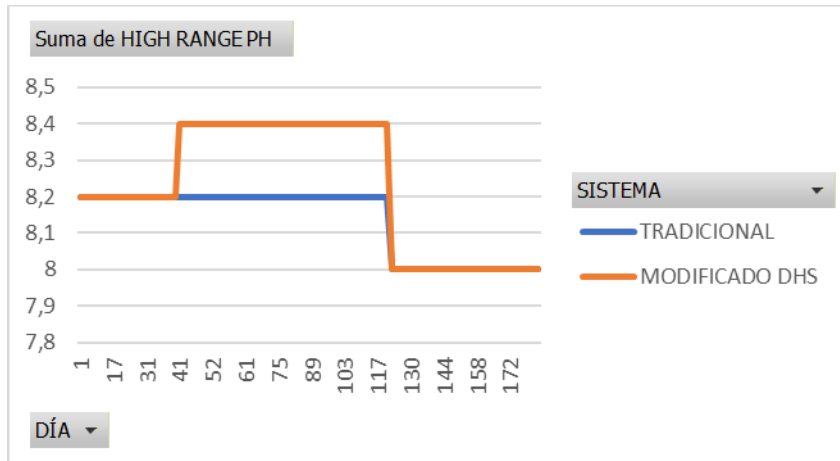
Nota. Se puede observar a una persona diligenciando el formato utilizado para el registro de los parámetros fisicoquímicos del agua, el cual permitió la organización sistemática de la información para su análisis y comparación entre los sistemas de recirculación acuícola evaluados.

Posteriormente los datos obtenidos fueron organizados y representados mediante gráficas elaboradas en Microsoft Excel, lo cual permitió visualizar el comportamiento de cada parámetro en el tiempo, lo que logro facilitar la comparación del desempeño entre ambos sistemas.

En primer lugar, se presentan los resultados correspondientes al sistema de recirculación acuícola tradicional y modificado tipo DHS, donde se analiza el comportamiento de las variables de calidad del agua registradas durante el periodo de estudio de manera diaria que se puede evidenciar en la figura 8.

Figura 8.

Día del sistema en funcionamiento vs Alto rango de pH



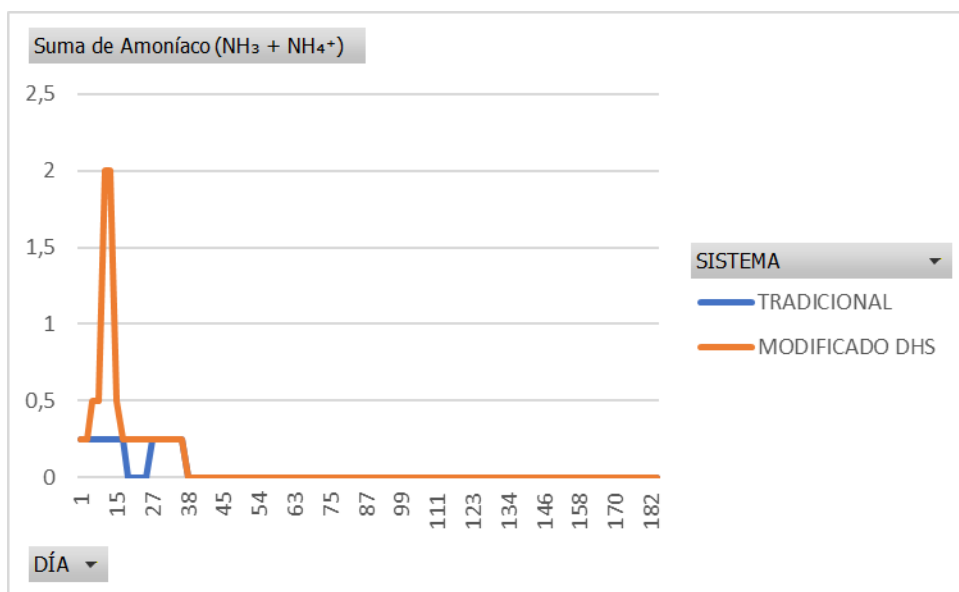
En la figura 8 se pudo evidenciar la cinética del pH en el sistema tradicional se evidencio inicialmente un valor aproximado de 8,2 desde el primer monitoreo, que se mantuvo estable durante gran parte del tiempo experimental; sin embargo, hacia el día 121 del periodo se evidencio una disminución hasta alcanzar un valor cercano a 8,0, manteniéndose estable en este nivel hasta la fecha. Este comportamiento está asociado a la nitrificación, que tiende a disminuir el pH debido a la producción de ácidos durante la oxidación del amonio, Asimismo, como la acumulación de compuestos nitrogenados y dinámicas propias del biofiltro, pero aun así se mantuvieron en un rango ligeramente alcalino. Mientras que en el modificado tipo DHS pH presento valores iniciales de 8,2, posteriores se evidencio un incremento a 8,4 manteniéndose estable hasta el día 121 que tomo un comportamiento de 8,00, donde se estabilizo hasta el final. Lo que quiere decir que los valores se están mantuvieron dentro de un rango, considerado adecuado para el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). En general, ambos sistemas se mantuvieron dentro de un rango alcalino (8,0 – 8,4), considerado adecuado para los sistemas acuícolas y procesos biológicos. Sin embargo, el sistema DHS presentó valores de pH ligeramente más altos y estables, lo que podría estar

asociado a una mayor actividad biológica o eficiencia del biofiltro en la regulación de las condiciones químicas del agua.

El análisis del amonio se realizó, debido a su carácter potencialmente tóxico para los organismos acuáticos y su papel como sustrato en los procesos de nitrificación. En este sentido, en la Figura 9 se muestra el comportamiento del amonio (NH_4^+) en función del tiempo, permitiendo evaluar la estabilidad del sistema y la eficiencia del biofiltro en la transformación de compuestos nitrogenados.

Figura 9.

Día del sistema en funcionamiento Vs Amoníaco



En la Figura 9 se observa la dinámica del amonio (NH_4^+) a lo largo del periodo experimental en los dos sistemas de recirculación acuícola. En el sistema tradicional, se registró una concentración inicial de 0,25 mg/L, la cual presentó ligeras variaciones durante los primeros días de monitoreo. Posteriormente, alrededor del día 40, la concentración descendió hasta alcanzar valores cercanos a 0 mg/L, manteniéndose en este nivel durante el resto del experimento.

Este comportamiento indica una adecuada eficiencia en los procesos de nitrificación, donde el amonio es transformado progresivamente en nitrito y posteriormente en nitrato, evidenciando la estabilización del sistema biológico.

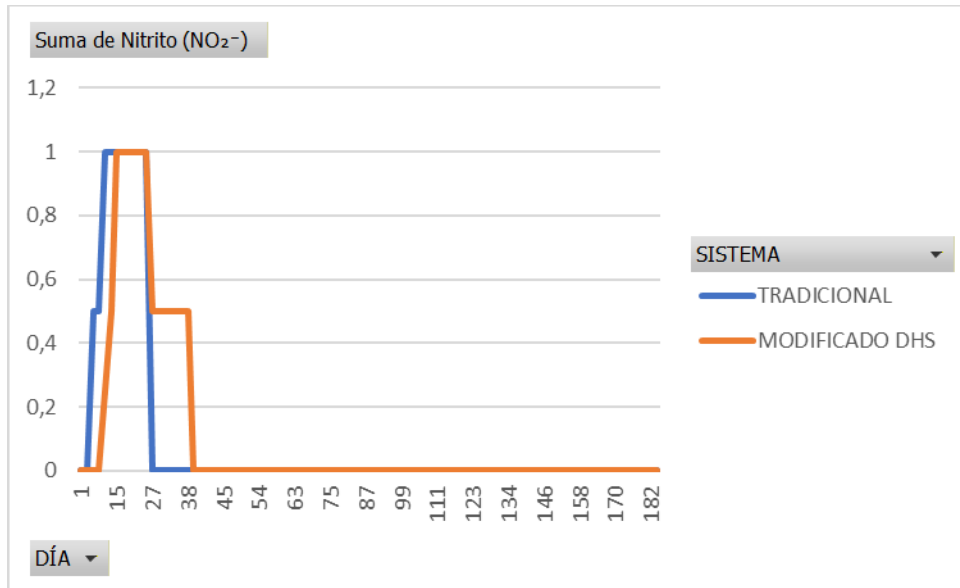
Por su parte, en el sistema RAS modificado tipo DHS se observó una mayor variabilidad inicial en las concentraciones de amonio, lo cual puede estar asociado al proceso de adaptación del sistema y al establecimiento de las bacterias nitrificantes en el biofiltro. No obstante, a partir del día 40 se evidenció una disminución progresiva hasta alcanzar valores cercanos a 0 mg/L, manteniéndose estables durante el resto del periodo experimental.

En términos generales, ambos sistemas lograron estabilizar el amonio, indicando un adecuado funcionamiento del proceso de nitrificación. Sin embargo, el sistema RAS tradicional evidenció una estabilización ligeramente más temprana, lo que sugiere una respuesta inicial más rápida en la transformación de este compuesto nitrogenado.

Por otro lado, la Figura 10 muestra la relación entre los días y la concentración de nitrito, un parámetro que es un compuesto intermedio en el proceso de nitrificación, originado a partir de la oxidación del amonio y posteriormente transformado en nitrato, por lo que su acumulación puede indicar desequilibrios de las bacterias nitrificantes. El seguimiento de su variación a lo largo del tiempo permitió analizar la maduración biológica del sistema, así como identificar posibles periodos de inestabilidad que puedan representar riesgos para los peces.

Figura 10.

Día del sistema en funcionamiento Vs Nitrito



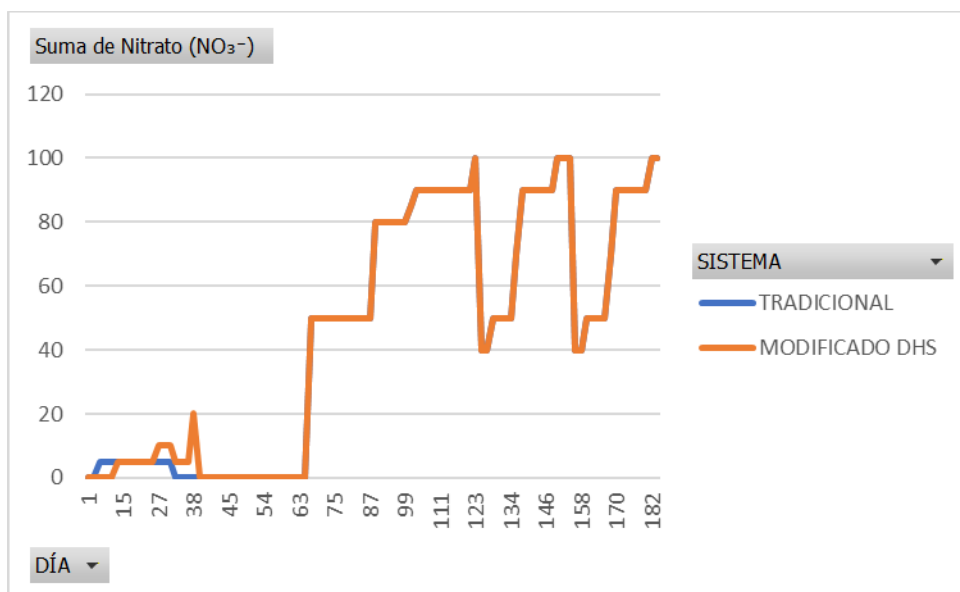
Inicialmente el sistema tradicional, no se registraron concentraciones de este compuesto; pero luego se evidenció su presencia, alcanzando valores de hasta 1 ppm. Posteriormente, a partir del día 26 del periodo de monitoreo, la concentración comenzó a disminuir hasta estabilizarse nuevamente en valores de 0 ppm, lo que indica adecuado funcionamiento de los procesos biológicos de transformación en el sistema. Durante los primeros días de monitoreo no existía presencia de nitrito en el sistema; no obstante, en el transcurso del tiempo se presentaron algunas variaciones en su concentración. Posteriormente, a partir del día 40 del periodo experimental, los valores de nitrito comenzaron a disminuir hasta estabilizarse en 0 ppm, condición que se mantiene hasta la fecha actual. Lo que sugiere un adecuado funcionamiento del proceso de nitrificación dentro del sistema. En términos generales, ambos sistemas lograron estabilizar las concentraciones de nitrito en 0 ppm, lo que indica un funcionamiento del proceso de nitrificación y una eficiente transformación del nitrito a nitrato. Sin embargo, el sistema

tradicional presentó una estabilización más temprana (alrededor del día 26), mientras que el sistema modificado alcanzó esta condición cerca del día 40, lo que indica que el sistema tradicional logró establecer más rápido el equilibrio biológico.

Asimismo, la Figura 11 presenta la relación entre los días de funcionamiento del sistema y la concentración de nitratos, permitió analizar la dinámica de este componente dentro del sistema. El monitoreo del nitrato, constituyo el producto final del proceso de nitrificación, reflejando indirectamente la eficiencia biológica del sistema en la transformación de compuestos nitrogenados más tóxicos como el amonio y el nitrito. A lo largo del periodo experimental, la variación en los niveles de nitrato permitió evaluar la estabilidad del sistema, así como su capacidad de asimilación y acumulación de nutrientes.

Figura 11.

Día del funcionamiento del sistema Vs Nitrato



En la figura 11 se puede evidenciar que inicialmente el sistema tradicional y modificado se presentaron valores de 0 ppm de nitrato; no obstante, con el transcurso del tiempo se evidenció un

incremento en su concentración. Posteriormente, los valores comenzaron a presentar variaciones constantes, oscilando aproximadamente entre 40 a 100 ppm, lo que refleja la acumulación gradual de este compuesto como resultado del proceso de nitrificación dentro del sistema, ya que ambos tienen un comportamiento similar se puede afirmar que ambos poseen la misma eficiencia para el sistema acuícola.

Igualmente, el comportamiento del pH y la temperatura en el sistema modificado tipo DHS, medidos mediante waterproof, evidenció una dinámica relativamente estable en términos térmicos, acompañada de una tendencia decreciente en los valores de pH en el periodo evaluado que se puede evidenciar en la Figura 12.

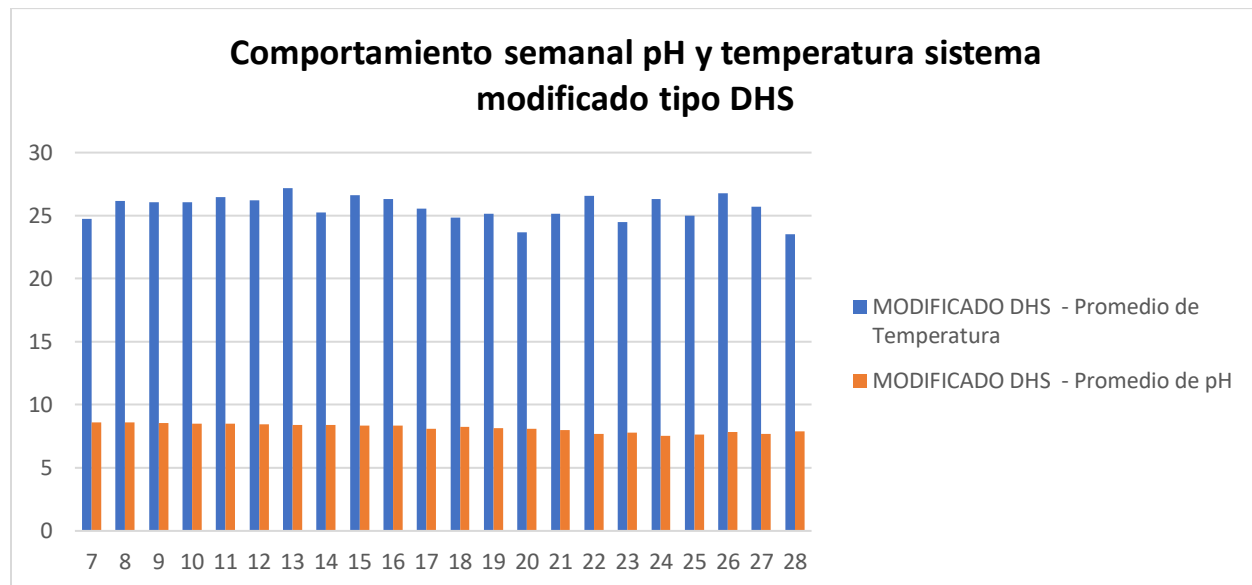
En relación con la temperatura, los registros oscilaron entre rangos de aproximadamente 23,5 °C y 27,17 °C, asimismo la mayor concentración de valores se ubicó entre 25 °C y 26,7 °C, lo que indica condiciones térmicas estables en el sistema, sin fluctuaciones bruscas que pudieran afectar negativamente a los peces del cultivo. Por su parte, el pH presentó una tendencia descendente progresiva. Inicialmente, se registraron valores cercanos a 8,6, característicos de un medio ligeramente alcalino; no obstante, estos disminuyeron gradualmente hasta alcanzar valores próximos a rangos entre 7,55 y 7,69 en los registros finales. Este comportamiento sugiere una acidificación gradual del sistema, posiblemente asociada a la acumulación de subproductos metabólicos, como dióxido de carbono y compuestos nitrogenados derivados de la actividad biológica.

Es importante resaltar que, aunque la temperatura presentó variaciones leves, no se evidencia una relación directa entre los cambios térmicos y la disminución del pH, lo que indica

que las variaciones en este último parámetro podrían estar más influenciadas por procesos internos del sistema que por factores térmicos.

Figura 12.

Comportamiento semanal del pH y temperatura en el sistema modificado DHS



Siguiendo la misma línea el comportamiento del pH y la temperatura en el sistema tradicional, evidenció una estabilidad térmica general, acompañada de una tendencia decreciente en los valores de pH que se puede evidenciar en la figura 13.

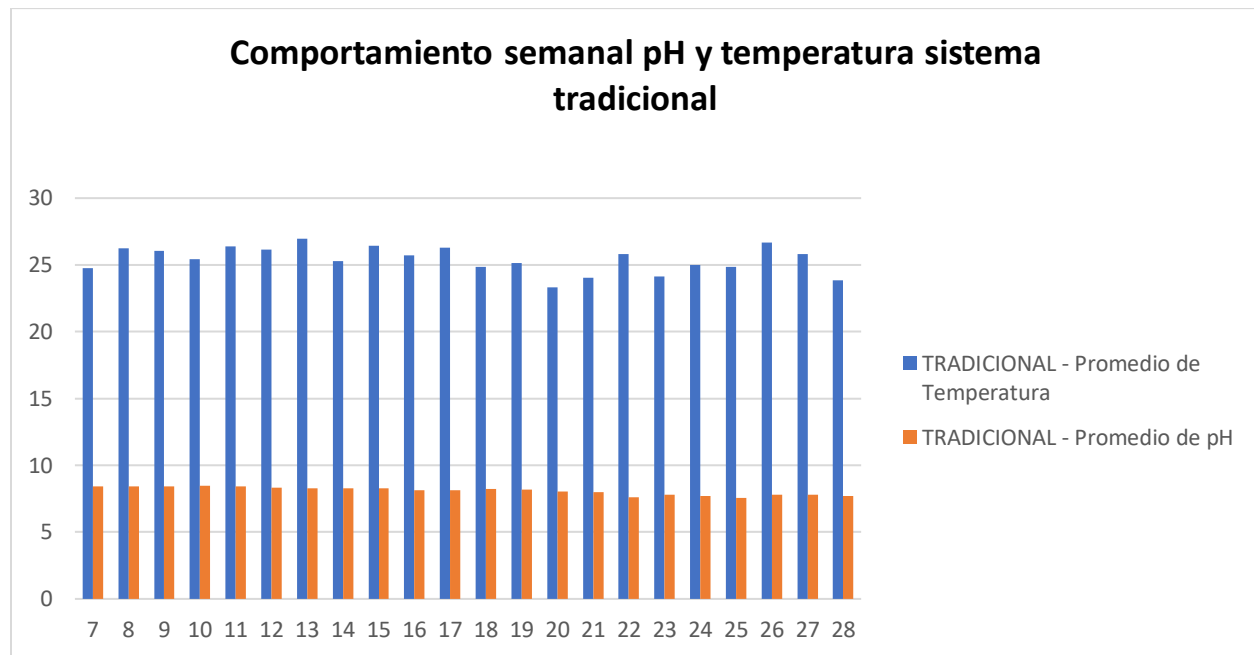
En cuanto a la temperatura, los registros oscilaron entre aproximadamente 23,33 °C y 26,95 °C, concentrándose principalmente entre 24 °C y 26,6 °C, lo que indica que el sistema se mantuvo en condiciones térmicas estables, sin variaciones que pudieran afectar significativamente.

Por su parte, el pH presentó una disminución progresiva durante el periodo evaluado. Los valores iniciales se ubicaron alrededor de 8,42 y 8,47, que son ligeramente alcalino; sin embargo, estos descendieron hasta alcanzar valores cercanos a 7,54 y 7,79 en los registros finales. Este

comportamiento sugiere un proceso de acidificación del sistema, posiblemente asociado a la acumulación de dióxido de carbono y subproductos.

Figura 13.

Comportamiento semanal de pH y temperatura de oxígeno el sistema tradicional



Los valores de oxígeno disuelto registrados durante las semanas evaluadas se mantuvieron como se muestra en la Figura 14, en su mayoría, dentro de rangos fueron aceptables para el adecuado desarrollo de la especie, tanto en concentración (mg/L) como en porcentaje de saturación. Se evidencian valores que oscilan principalmente entre 5,5 y 7,0 mg/L, equivalentes aproximadamente a saturaciones entre el 60 % y 90 %, condiciones que favorecen el crecimiento, la alimentación y el bienestar fisiológico de los peces. Para la tilapia, concentraciones superiores

a 5 mg/L se consideran adecuadas para un crecimiento normal, mientras que rangos entre 6 y 8 mg/L corresponden a condiciones óptimas.

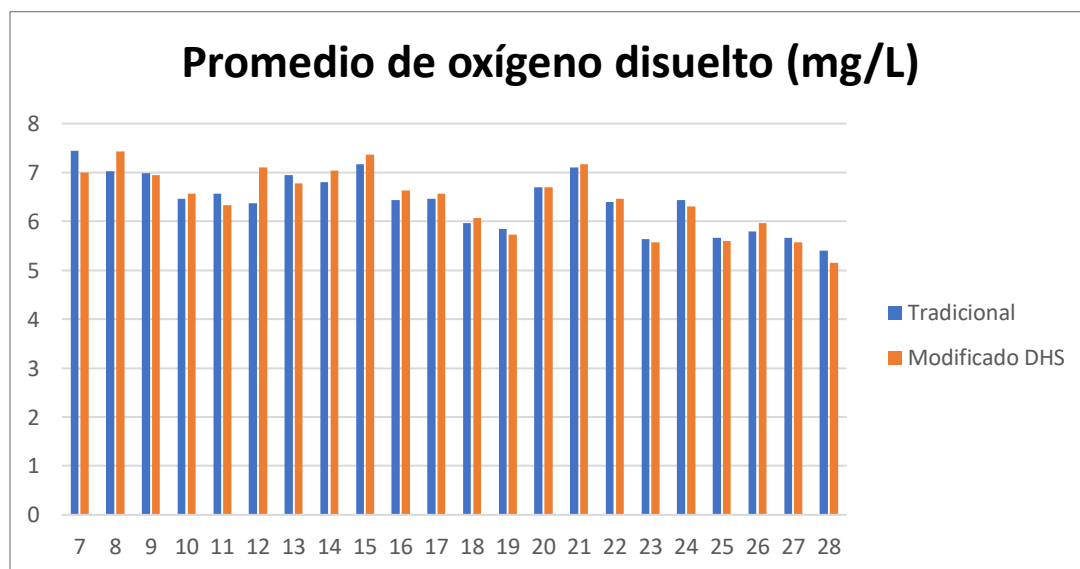
Pero es necesario mencionar que alrededor de la semana 20 se observa una disminución importante tanto en mg/L como en el porcentaje de saturación, lo que representa un punto de vigilancia ya que niveles inferiores al 50 % de saturación pueden generar estrés, disminución en el consumo de alimento y reducción en la tasa de crecimiento. Aun así, la posterior recuperación parcial de los valores sugiere que el sistema logró restablecer condiciones favorables de oxigenación. En términos generales, el comportamiento observado indica que el sistema tradicional mantuvo condiciones adecuadas para la producción de tilapia roja durante la mayor parte del periodo evaluado. En el sistema modificado que se evidencia en la Figura 14 de cultivo de tilapia roja, el comportamiento del oxígeno disuelto evidenció un comportamiento estable durante la etapa experimental, con valores de rangos entre 5,0 y 7,2 mg/L, equivalentes aproximadamente a porcentajes de saturación entre 65 % y 90 %. Durante las primeras semanas se observan concentraciones más altas, cercanas a 7,0 mg/L, lo que refleja condiciones adecuadas de calidad del agua y una disponibilidad favorable de oxígeno para el desarrollo de los peces, en la mitad del periodo se presenta una disminución moderada entre las semanas 18 y 20, seguida de una recuperación en la semana 21, donde nuevamente se alcanzan valores cercanos a los niveles iniciales. Posteriormente, se observa una leve fluctuación con tendencia descendente hacia las últimas semanas, finalizando alrededor de 5,0 mg/L y un porcentaje cercano al 65 %.

Lo que quiere decir que el sistema modificado mantuvo niveles de oxígeno disuelto dentro de rangos aceptables para el cultivo de tilapia roja durante la mayor parte del periodo de estudio. Sin embargo, la disminución progresiva observada en las últimas semanas representa un punto de seguimiento.

El sistema modificado se consideró más favorable que el sistema tradicional debido a que presentó una mayor estabilidad en los niveles de oxígeno disuelto a lo largo del periodo evaluado, tanto en concentración (mg/L) como en porcentaje de saturación. A diferencia del sistema tradicional, en el cual se evidenció una caída más pronunciada alrededor de la semana 20, el sistema modificado mostró fluctuaciones menos bruscas y una recuperación más uniforme, lo que indica un mejor control de las condiciones de calidad del agua. Además, el mayor porcentaje de saturación observado en el sistema modificado sugiere una mejor disponibilidad de oxígeno en el agua, lo cual puede estar asociado a mejoras en la aireación, recirculación o manejo del sistema

Figura 14.

Promedio de oxígeno disuelto (mg/L) del sistema tradicional y modificado DHS



6.3 Tercera Etapa. Conocer el crecimiento, biomasa y mortalidad de la tilapia roja en los dos sistemas.

Con el fin de abarcar el crecimiento, la biomasa y la mortalidad de los peces (tilapia roja) en los dos sistemas de cultivo evaluados, se realizó un seguimiento periódico de los sembrados

sistema DHS y en el sistema tradicional. Es necesario acotar que el 25 de octubre se realizó la siembra de los organismos, registrándose un total de 74 individuos en el sistema DHS y 68 en el sistema tradicional respectivamente.

En consecuencia, durante el periodo de cultivo se realizaron muestreos en diferentes fechas con el fin de evaluar el crecimiento de los peces. En cada muestreo se eligió una muestra representativa de individuos por sistema, a los cuales se les registró el número de peces y el peso en gramos, así como un seguimiento del número total de peces a lo largo del tiempo.

A partir de esta información se elaboraron unas figuras comparativas, en las cuales se presentan los registros del sistema DHS y del sistema tradicional, que permitieron analizar las variaciones en el crecimiento, los cambios y las posibles pérdidas durante el periodo de cultivo, lo cual contribuye a evaluar el desempeño productivo de los dos sistemas.

Adicionalmente, en la Figura 15 complementaria se muestra el procedimiento empleado para el pesaje y la medición de los individuos, permitiendo visualizar parte de la metodología que se aplicó durante los muestreos.

Figura 15.

Pesaje y medición de los individuos de tilapia roja (Oreochromis sp.)

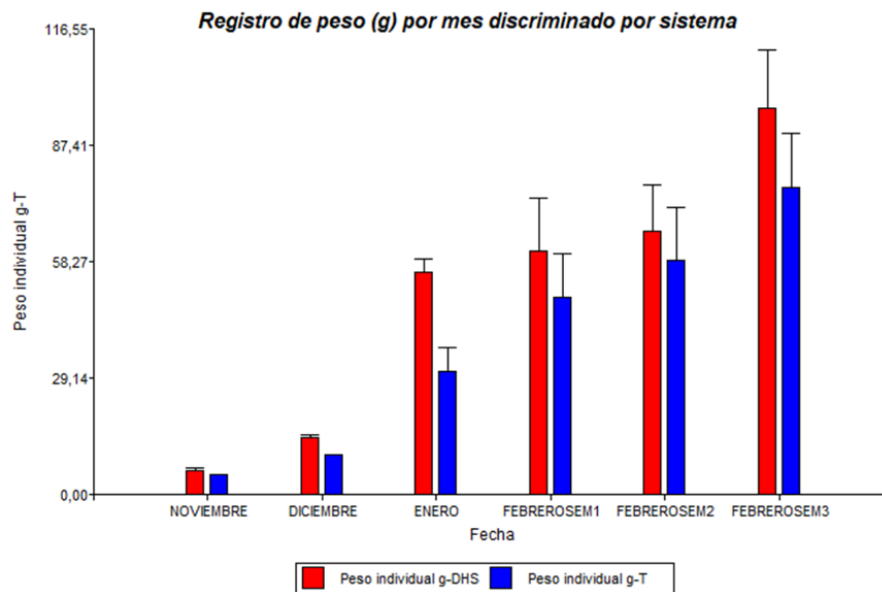


En la Figura 16 que es corresponde al registro de peso por mes se puede apreciar el peso para el sistema modificado tipo DHS (azul) y tradicional (rojo) en gramos. Igualmente, con base en esto se visualizó una tendencia de crecimiento progresivo en ambos sistemas, lo que indica que, las condiciones proporcionadas fueron favorables para el desarrollo de los organismos, no obstante, se presenció un mayor crecimiento en el sistema DHS, considerando que la muestra estuvo compuesta de la misma cantidad de peces en las últimas tres mediciones atribuidas al mes de febrero.

No obstante, al realizar la comparación entre tratamientos, se observa que el sistema modificado tipo DSH presentó consistentemente mayores valores de peso promedio en relación con el otro sistema. Durante las primeras etapas del cultivo, correspondientes a los meses de noviembre y diciembre, las diferencias entre ambos sistemas fueron poco evidentes, lo cual puede asociarse a la fase inicial de adaptación de los peces, en la que el impacto de las condiciones aún no se manifestaba de manera significativa.

A partir del mes de enero, se empieza a evidenciar una diferenciación más clara en el desempeño productivo, donde el sistema modificado tipo DSH muestra una mayor ganancia de peso, esta tendencia continúa a lo largo del mes de febrero, especialmente en las semanas finales del seguimiento, en las que la diferencia entre ambos sistemas se amplía de manera significativa, confirmando una mayor eficiencia del sistema modificado en términos de crecimiento individual.

En cuanto a la variabilidad de los datos, representada mediante las barras de error, se aprecia una dispersión moderada en ambos sistemas, siendo ligeramente superior en el sistema DSH en las etapas finales. Sin embargo, esta variabilidad no afecta la tendencia general observada, ya que los valores promedio del sistema modificado se mantienen por encima de los del sistema tradicional en todo el periodo experimental.

Figura 16.*Registro de peso (g) por mes*

En conjunto, estos resultados sugieren que el sistema DSH ofrece condiciones más favorables para el crecimiento de los peces, reflejándose en una mayor ganancia de peso y, por ende, en un mejor desempeño productivo en comparación con el sistema RAS tradicional. Esto podría estar asociado a mejoras en la calidad del agua, eficiencia en los procesos de recirculación o en la disponibilidad de oxígeno, factores que influyen directamente en el metabolismo y desarrollo de los organismos.

Teniendo presente la información que se recolecto, es necesario acotar que el número de alevinos era mayor para cada sistema, no obstante, una cantidad de estos murieron tan pronto se introdujeron al sistema, por lo que no se tuvieron en cuenta en el estudio.

En el primer muestreo realizado el 25 de noviembre se registraron 73 peces en el sistema DHS con una biomasa total de 417 g, mientras que en el sistema tradicional se contabilizaron 67

peces con una biomasa total de 323 g. Estos resultados evidencian una mayor biomasa acumulada en el sistema DHS durante la primera etapa del cultivo.

En los muestreos efectuados durante los meses de enero y febrero, se continuó con el registro del peso de los peces mediante muestreos representativos, lo que arrojó resultados con una tendencia de incremento constante en el peso de los organismos en ambos sistemas, lo cual refleja el crecimiento adecuado de los peces durante el periodo de cultivo.

No obstante, al comparar los valores máximos de peso registrados, se observó que las tilapias del sistema modificado tipo DHS alcanzaron pesos superiores situándose en 152 gramos, mientras que en el sistema tradicional el valor máximo registrado fue de 143 gramos, lo que afirma que el sistema modificado estuvo relacionado con el mejor crecimiento individual de los peces.

De igual modo se tiene en cuenta la supervivencia, en el final del periodo de evaluación, ya que se registraron 70 peces en el sistema modificado tipo DHS 60 peces en el sistema tradicional respectivamente, lo que indicó una mayor supervivencia en el sistema DHS en comparación con el sistema tradicional, ya que en el primero se inició con un total de 74 peces mientras que el segundo se inició con 68 peces, lo que indica la muerte de 4 y 8 peces en cada sistema respectivo.

Siguiendo la misma línea, es necesario hacer referencia a la figura 18, donde la longitud total de los peces evaluada durante el mes de febrero presentó una tendencia creciente constatada en ambos sistemas de cultivo a lo largo de las tres semanas, evidenciando un desarrollo progresivo de los peces hacia el final del periodo experimental.

En la primera semana, los peces del sistema modificado tipo DSH registraron una longitud promedio de aproximadamente 13,2 cm, mientras que en el sistema tradicional se obtuvo un valor

cercano a 11 cm, lo que representa una diferencia inicial de alrededor de 2,2 cm a favor del sistema modificado.

Durante la segunda semana, se observó un incremento en ambos tratamientos, alcanzando valores aproximados de 13,8 cm en el sistema modificado tipo DSH y 13,1 cm en el sistema tradicional. En esta etapa, se logró evidenciar que la diferencia entre sistemas se reduce levemente; sin embargo, el sistema modificado mantiene valores superiores de longitud.

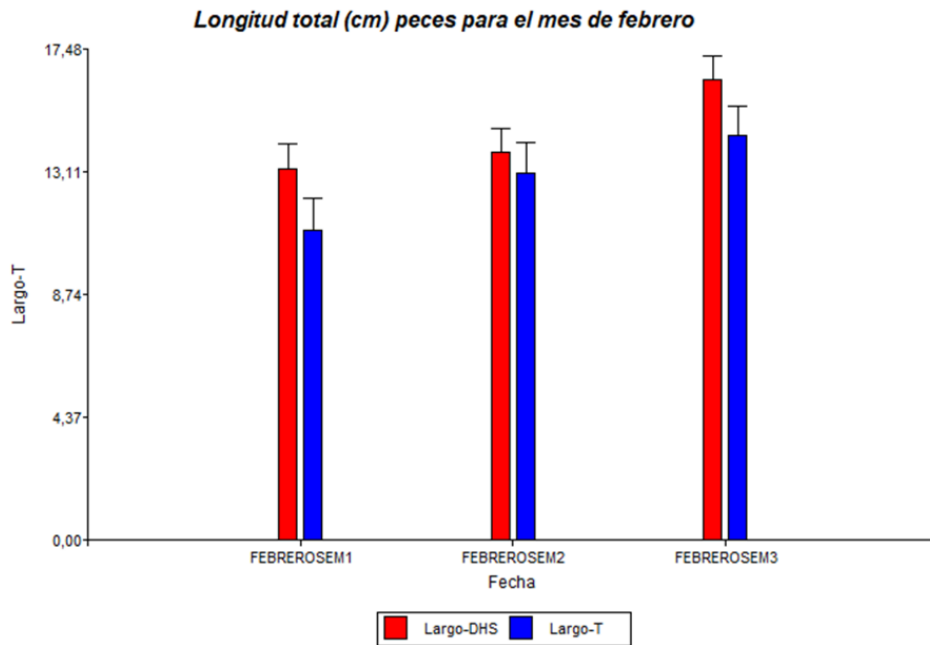
Finalmente, en la tercera semana, se registraron las mayores longitudes promedio del periodo, con valores cercanos a 16,4 cm para el sistema DSH y 14,4 cm para el sistema tradicional, evidenciando nuevamente una ampliación de la diferencia de aproximadamente 2 cm.

En cuanto a la variabilidad de los datos, se observó una dispersión moderada en ambos sistemas, ligeramente más visible en el sistema modificado tipo DSH en la última semana. No obstante, esta variabilidad no modifica la tendencia general, la cual tiene valores más altos para el sistema modificado basado en longitud.

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema modificado tipo DSH llevo a un mayor crecimiento longitudinal de los peces en comparación con el sistema tradicional durante el último mes del periodo experimental.

Figura 17.

Longitud total (cm) de los peces para el mes de febrero.



Finalmente, estos datos llevaron a evidenciar que el sistema tradicional tipo DHS presentó un mejor desempeño productivo, mostrando valores grandes de biomasa, mayores pesos individuales y cantidad de peces sobrevivientes durante el periodo de cultivo.

Para esa etapa de crecimiento fue necesario realizar un programa de alimentación basado en un programa de alimentación de Italcol, donde este programa fue diseñado considerando el peso inicial de los peces, la biomasa estimada y los requerimientos nutricionales en cada etapa del cultivo, para lograr garantizar un suministro adecuado de alimento que favoreciera el desarrollo idóneo de los peces.

Antes de especificar esto es necesario aclarar que, durante el primer mes, los peces fueron alimentados bajo un esquema de consumo a voluntad, permitiendo una ingesta libre de alimento, consecutivamente, en el segundo mes, específicamente el 25 de noviembre, se realizó el primer

pesaje, el cual permitió ajustar la ración suministrada de acuerdo con el crecimiento, a partir de esta revisión y control, se evidenció que hubo un mayor aprovechamiento del alimento en el sistema tipo DHS, lo que se reflejó en un incremento en el consumo y, consecuentemente, en una ventaja inicial en términos de crecimiento frente al sistema tradicional.

En la Tabla 9 se detallan parámetros peso promedio, número de peces, biomasa, tasa de alimentación, cantidad de alimento suministrado y frecuencia diaria de alimentación, los cuales fueron esenciales para el seguimiento.

Tabla 9

Programa de alimentación sistema tradicional

Fecha	Peces	Peso promedio (g)	Biomasa (g)	% alimentación	Alimento día (g)	Veces/día	g por ración
25 nov	67	4,82089552	323	8,5%	27,455	8	3,431875
25 dic	62	10,0483871	623	8,5%	52,955	8	6,619375
25 ene	60	30,75	1845	5,5%	101,475	7	14,496428
12 feb	60	35,974	359,74	5,5%	118,7142	7	16,959171

19 feb	60	53	530	5,5%	174,9	7	24,985714
							3
26 feb	60	69,7	697	4,0%	127,2	6	21,2

Con los datos registrados se pudo observar un crecimiento sostenido del peso promedio de los peces, pasando de 4,82 g en noviembre a 69,7 g en febrero, lo que indica un desarrollo idóneo manteniendo ciertas condiciones de manejo y alimentación. Este incremento es progresivo y consistente, sin caídas con valores significativos, lo que llevo a la determinación de un buen estado fisiológico de los organismos.

En el mismo ambiro en el número de peces, se observó una disminución de 67 a 60 individuos entre noviembre y enero, y posteriormente se mantuvo un periodo constante. Lo que se asoció principalmente a la mortalidad inicial o procesos de selección y estabilización del sistema, ya que en periodos posteriores se mantuvo constante.

Asimismo, en la biomasa, se presenta un aumento acorde con el crecimiento ya que en el mes de noviembre fue de 323 g y llegando a enero con 1845 g, no obstante, es necesario aclarar que, a partir de febrero, los valores registrados 359,74 g, 530 g y 697 g respectivamente no representan la biomasa total del sistema, sino que corresponden a muestras pequeñas, lo cual evita interpretaciones erróneas sobre pérdidas a nivel productivo del sistema.

La tasa de alimentación muestra una disminución de 8,5% a 4,0%, lo cual se asocia a que los requerimientos relativos disminuyen a medida que los peces aumentan su peso.

El alimento suministrado por día aumento en función del crecimiento de los peces hasta el 19 de febrero con un total de 174,9 g, posterior a ello se dio una disminución el 26 de febrero a 127,2 g.

Por último, la periodicidad de alimentación se disminuyó paulatinamente de 8 a 6 veces por día, mientras que la cantidad por ración aumenta, mostrando una estrategia de alimentación que se ajusta al tamaño y capacidad de consumo de los peces.

Es se acotar que este mismo programa de alimentación se aplicó al sistema modificado tipo DHS, haciendo las respectivas conversiones que se evidencian en la Tabla 10.

Tabla 10

Programa de alimentación sistema DHS

Fech a	Pece s	Peso promedio (g)	Biomasa a (g)	% alimentación n	Alimento día (g)	Veces/día a	g por ración
25 nov	73	5,71232876 7	417	8,5%	35,445	8	4,430625
25 dic	71	14,8732394 4	1056	8,5%	89,76	8	11,22
25 ene	71	43,3802816 9	3080	5,5%	169	7	24,142857 1
12 feb	70	60,781	607,81	5,5%	234,00685	7	33,42955
19 feb	70	53,7	537	5,5%	206,745	7	29,535

26	70	96,8	968	4,0%	271,04	6	45,173333
feb							3

Se logro ver un crecimiento progresivo del peso promedio de los peces, ya que pasaron de 5,71 g en noviembre a 96,8 g en febrero, lo cual muestra un desarrollo favorable bajo el programa de alimentación aplicado, además se presenta una leve variación en febrero (19 de febrero), que pudo darse debido a condiciones de muestreo o manipulación.

Asimismo, en la biomasa, se observó un incremento inicial coherente con el crecimiento y el número de individuos. No obstante, en febrero, los valores consolidados no corresponden a la biomasa total del sistema, sino a biomاسas estimadas a partir de muestras pequeñas, lo que explica las inconsistencias en los datos y evita interpretaciones erróneas sobre la reducción de la producción.

La tasa de alimentación presenta una reducción paulatina de 8,5% a 4,0%, lo cual es adecuado desde el punto de vista técnico, puesto que los requerimientos relativos disminuyen conforme aumenta el peso de los peces.

Asimismo, el suministro de alimento diario y la cantidad por ración se incrementan de manera proporcional al crecimiento observado, mientras que la frecuencia de alimentación disminuye de 8 a 6 veces/día, lo cual se asocia con prácticas acuícolas eficientes.

7. Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian diferencias relevantes en el desempeño técnico y productivo entre el sistema de recirculación acuícola (RAS) tradicional y el sistema modificado tipo DHS, las cuales se explican a partir de la interacción entre la estabilidad

de los parámetros del agua, la eficiencia de los procesos de nitrificación y las características estructurales de cada sistema.

Por ello en relación con la calidad del agua, ambos sistemas mantuvieron valores de pH dentro de un rango ligeramente alcalino (8,0 – 8,4), considerado adecuado, pero, en el sistema modificado tipo DHS se presentó una mayor estabilidad en este parámetro, lo que sugiere un mejor equilibrio en los procesos biológicos internos. Este comportamiento identifico eficiencia en la biofiltración, ya que la nitrificación genero una disminución progresiva del pH debido a la producción de ácidos durante la oxidación del amonio (Timmons & Ebeling, 2018). Por ello, la estabilidad observada en el sistema modificado indica una mejor capacidad de regulación química del sistema, que es clave en sistemas intensivos.

El comportamiento del amonio en ambos sistemas mostró una tendencia descendente hasta alcanzar concentraciones cercanas a 0 mg/L después del día 40, lo que muestra la consolidación del proceso de nitrificación. No obstante, el sistema tradicional presentó una estabilización más temprana, que sugiere una respuesta inicial rápida del biofiltro. Este resultado puede estar relacionado con una menor complejidad estructural del sistema, mejorando la colonización bacteriana en las etapas tempranas. Asimismo, es necesario acotar que el sistema modificado tipo DHS alcanzó niveles igualmente estables, lo que coincide con lo expresado por Malone y Pfeiffer (2016), quienes dicen que los sistemas con biofiltros optimizados pueden requerir un mayor tiempo de adaptación, pero ofrecen mayor estabilidad operativa una vez establecidos.

En el contexto del nitrito, ambos se lograron estabilizar sus concentraciones en 0 ppm, lo que indica una nitrificación completa y eficiente. Sin embargo, el sistema tradicional alcanzó esta condición en menor tiempo cerca del día 26, mientras que el sistema modificado lo hizo cerca del día 40, lo que muestra directamente que el establecimiento de las comunidades bacterianas

nitrificantes puede ser más lento en sistemas con mayor complejidad hidráulica o biológica (Prosser & Nicol, 2018). Pero igualmente llegan al mismo fin, que consiste en la estabilización que confirma un buen funcionamiento del biofiltro, evitando la acumulación de compuestos intermedios potencialmente tóxicos.

Por otro lado, la acumulación de nitratos en ambos sistemas, con valores entre 40 y 100 ppm, refleja el funcionamiento continuo del proceso de nitrificación. Dado que el nitrato es el producto final de este proceso y presenta menor toxicidad relativa, su incremento es esperado en este tipo de configuración (FAO, 2022). Durante el periodo experimental se realizaron recambios parciales de agua en diferentes momentos, los cuales correspondieron a un bajo porcentaje del volumen total del sistema, siendo aplicados de manera puntual y no frecuente.

A pesar de estos recambios limitados, las concentraciones de nitrato se mantuvieron dentro de rangos aceptables para la especie, sin alcanzar niveles críticos, lo que indica que el sistema tuvo la capacidad de autorregularse. Este comportamiento sugiere que, además del proceso de nitrificación, pudo haberse presentado una dinámica de estabilización interna asociada al sistema, ya que no se evidenció acumulación de nitritos, los cuales permanecieron cercanos a cero durante el periodo de estudio. En este sentido, uno de los resultados más relevantes fue que no fue necesario realizar recambios constantes de agua para mantener la calidad del sistema, lo que resalta la eficiencia del sistema RAS modificado. Esto aporta solidez a los resultados obtenidos, ya que demuestra que el sistema puede operar con bajo recambio de agua sin comprometer la estabilidad de los parámetros fisicoquímicos ni el bienestar de los organismos.

Por otro lado, en el contexto productivo, los resultados mostraron un mejor desempeño del sistema modificado tipo DHS, con valores más altos de crecimiento individual, biomasa acumulada y supervivencia, los individuos en este sistema alcanzaron pesos superiores de 152

gramos frente a 143 gramos en el sistema tradicional en su última medición y presentaron una mayor biomasa dentro del periodo experimental. Este comportamiento se refuta con lo planteado por El-Sayed (2019), quien afirma que la estabilidad en la calidad del agua influye en la eficiencia metabólica y el crecimiento de la tilapia, minimizando el estrés fisiológico y optimizando la conversión alimenticia.

En relación con esto, estudios actuales han evidenciado que los sistemas RAS modificados, al incorporar mejoras en biofiltración, control hidráulico y monitoreo, tienden a presentar mayores tasas de crecimiento y eficiencia productiva (Hashmi et al., 2025). Esto permite inferir que las condiciones generadas en el sistema modificado tipo DHS favorecieron a un ambiente idóneo, posiblemente debido a una buena oxigenación, menor acumulación de sólidos y mayor estabilidad en los parámetros (Malone & Pfeiffer, 2016).

Pero también, es importante destacar que el sistema modificado tipo DHS presentó una alta variabilidad en el crecimiento de los peces, que se evidencio por la dispersión en los valores de peso, lo sugiere que, aunque el sistema permite alcanzar valores más altos de crecimiento, no todos los peces se benefician de manera homogénea. Esta variabilidad puede estar asociada a factores como competencia por alimento, micro variaciones o distribuciones irregulares de recursos, lo cual coincide con lo señalado por Boyd (2020), quien indica que la heterogeneidad en sistemas intensivos puede influir en la uniformidad del crecimiento.

En cuanto a la supervivencia, el sistema modificado tipo DHS presentó menores pérdidas en comparación con el otro sistema, lo que da un sustento a la hipótesis de que un ambiente más estable reduce el estrés y mejora la resistencia. Terminado, aunque ambos sistemas demostraron ser técnicamente viables para el cultivo de tilapia roja, el sistema modificado tipo DHS evidenció

un mejor desempeño global en cuestión productiva. No obstante, también fue necesario considerar que la estabilización biológica inicial fue más lenta y que existe una mayor variabilidad en el crecimiento, lo que indica la necesidad de ajustes en el manejo operativo para maximizar su eficiencia. Como resultados de esta investigación se aporta una evidencia que respalda la implementación de sistemas RAS modificados como una alternativa más eficiente para la producción acuícola intensiva.

8. Conclusiones

Al analizar los dos sistemas de recirculación acuícola (RAS) se observó que se mantuvieron condiciones adecuadas de calidad del agua para el cultivo de tilapia roja, con valores de pH dentro de un rango ligeramente alcalino, con variaciones poco significativas de amonio y nitrito que posteriormente lograron la estabilización en cero, lo que confirmo que en general, ambos sistemas demostraron un funcionamiento eficiente en los procesos de nitrificación.

En relación con la evaluación del desempeño productivo, se evidencio un crecimiento progresivo en ambos sistemas; no obstante, el sistema modificado tipo DHS alcanzó mayores pesos individuales y mayor biomasa acumulada, asimismo, presentó una menor mortalidad en este caso de 4 individuos en comparación con el sistema tradicional 8 individuos, lo que se asoció con una mayor tasa de supervivencia.

Finalmente, se concluye que, aunque ambos sistemas son viables para el cultivo de tilapia roja bajo condiciones controladas, el sistema modificado tipo DHS mostró una mayor eficiencia global, ya que se alcanzó a mostrar un mayor crecimiento de los organismos y mayor supervivencia, situándose como una clara alternativa favorable y eficiente para la producción de Tilapia Roja.

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio comparativo de ambos sistemas enfocado en el crecimiento de los organismos, incrementando la frecuencia de medición de los parámetros, con el fin de obtener datos más representativos y reducir posibles discrepancias asociadas al uso de la misma submuestra.

Ampliar el tiempo de evaluación hasta alcanzar pesos comerciales permitiría validar si las ventajas observadas en el sistema modificado DHS se mantienen a lo largo de todo el ciclo productivo, hasta que los individuos estén listos para la comercialización. Asimismo, un mayor número de unidades experimentales, con el propósito de fortalecer la robustez estadística de los resultados y reducir posibles sesgos asociados a condiciones específicas del ensayo.

En el mismo ámbito, se recomienda realizar la replicación del sistema RAS modificado tipo DHS en diferentes condiciones, para validar la consistencia y reproducibilidad de los resultados obtenidos, donde se deben tener en cuenta variaciones en factores como la densidad de siembra, condiciones climáticas, escalas de producción y manejo operativo, lo que permitirá evaluar el comportamiento del sistema.

Referencias Bibliográficas

- AUNAP. (2023). *Estadísticas del sector acuícola colombiano 2022–2023*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca. <https://www.aunap.gov.co>
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). *Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges*. *Aquacultural Engineering*, 51, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2018). *Recirculating aquaculture systems (RAS): Main issues on management and future challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.003>
- Bartelme, R. P., Smith, M. C., Sepulveda-Villet, O. J., & Newton, R. J. (2017). *Freshwater recirculating aquaculture system operations drive biofilter bacterial community shifts around a stable nitrifying consortium of ammonia-oxidizing archaea and Nitrospira*. *Frontiers in Microbiology*, 8, 101. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00101>
- Bjørngen, H., Koppang, E. O., & Nowak, B. F. (2025). *Gill health in fish farmed in recirculating aquaculture systems (RAS): A review*. *Journal of Fish Diseases*, 48(3), e14057. <https://doi.org/10.1111/jfd.14057>
- Boyd, C. E. (2020). *Water quality: An introduction (2nd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Brown, A. R., Wilson, R. W., & Tyler, C. R. (2025). *Assessing the benefits and challenges of recirculating aquaculture systems (RAS) for Atlantic salmon production*. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 33(3), 380–401. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2433581>

- Cavendish International. (2020). Biofilters in recirculating aquaculture systems. <https://www.cavendish.ac/biofilters>
- Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO). (2022). *Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de recirculación acuícola (RAS) en el cultivo de tilapia roja en Tolima y Huila* [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional UNIMINUTO. <https://repository.uniminuto.edu>
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C., & Summerfelt, S. (2016). *Comparing the effects of tank design on the performance of a cold-water recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering*, 74, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.06.001>
- El-Sayed, A.-F. M. (2019). *Tilapia culture (2nd ed.)*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04085-5>
- Ende, S., Henjes, J., Spiller, M., Elshobary, M., & Hanelt, D. (2024). *Recent advances in recirculating aquaculture systems and role of microalgae to close system loop. Bioresource Technology*, 407, 131107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131107>
- Espinal, C. A., & Matulić, D. (2019). *Recirculating aquaculture technologies. En J. M. M. Raviv et al. (Eds.), Aquaponics food production systems* (pp. 35–76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_3
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020: Sustainability in action*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022*. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- García Hernández, N., Villamil Díaz, L. M., Aragón Rojas, S., Valle Vargas, M. F., Montes Rodríguez, C. D., Cobo Ángel, M. I., Hernández Benítez, R. E., & Egurrola Pedraza, E. D. (2023). *Modelo de crecimiento de tilapia en sistemas de recirculación para acuicultura*.

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería.

<https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3828>

Grandez-Yoplac, D. E., Pachas-Caycho, M., Cristobal, J., & Chapa-Gonza, S. (2025).

*Recirculating aquaculture systems (RAS) for cultivating *Oncorhynchus mykiss* and the potential for IoT integration: A systematic review and bibliometric analysis. Sustainability*, 17(15), 6729. <https://doi.org/10.3390/su17156729>

Gruber, N., & Galloway, J. N. (2018). *An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature*, 451(7176), 293–296. <https://doi.org/10.1038/nature06592>

Gupta, S., Makridis, P., Henry, I. A., Velle-George, M., Ribicic, D., Bhatnagar, A., Skalska-Tuomi, K., Daneshvar, E., Ciani, E., Persson, D. W., & Netzer, R. (2024). *Recent developments in recirculating aquaculture systems: A review. Aquaculture Research, Article 6096671.* <https://doi.org/10.1155/are/6096671>

Hargreaves, J. A. (2020). *Nitrogen transformations in aquaculture systems.* <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735551>

Hashmi, Z., Metali, F., Nugroho, W. A., Saifullah Abu Bakar, M., Wibisono, Y., et al. (2025). *Recirculating aquaculture systems: Advances, impacts, and integrated pathways for sustainable growth. Bioresource Technology Reports*, 32, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102340>

Huang, Y., Sun, F., & Pan, L. (2021). *Advances in biofiltration technology for recirculating aquaculture systems: Performance, mechanisms and future prospects. Aquacultural Engineering*, 94, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102188>

Laborde, A., Smith, E., & García, R. (2023). *Lab- and pilot-scale photo-biofilter performance with algal–bacterial beads in a recirculation aquaculture system for rearing rainbow trout.*

- Journal of Applied Phycology*, 35, 1673–1683. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02981-6>
- Li, C., Iber, B. T., Torsabo, D., Kamaruzzan, A. S., Nor, M. N. M., Sheikh Abdullah, S. R., Shafie, M. S., & Manan, H. (2025). *Exploring carbon sources in biofloc technology for enhanced aquaculture and environmental sustainability*. *Food*, 5, 207. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00495-3>
- Li, S., Zhao, L., & Zhang, Z. (2024). *Optimization of water quality control in intensive recirculating aquaculture systems using real-time monitoring and machine learning*. *Aquaculture Reports*, 29, 101680. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.101680>
- Liu, W., Du, X., Tan, H., Xie, J., Luo, G., & Sun, D. (2021). *Performance of a recirculating aquaculture system using biofloc biofilters with convertible water-treatment efficiencies*. *Science of the Total Environment*, 754, 141918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141918>
- Lu, Z., Lin, W., Li, Q., Wu, Q., Ren, Z., Mu, C., Wang, C., Shi, C., & Ye, Y. (2024). *Recirculating aquaculture system as microbial community and water quality management strategy in the larviculture of *Scylla paramamosain**. *Water Research*, 252, 121218. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121218>
- Malone, R. F., & Pfeiffer, T. J. (2006). *Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems*. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 389–402. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.007>
- MDPI. (2022). *Effect of filter medium on water quality during passive biofilter activation in a recirculating aquaculture system*. *Energies*, 15(19), 6890. <https://doi.org/10.3390/en15196890>

- Mugwanya, M., et al. (2022). *A review on recirculating aquaculture system: Influence of stocking density on fish and crustacean behaviour, growth performance, and immunity*. *Annals of Animal Science*, 22(3), 873–884. <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0014>
- Nugraha, M. A. R., Dewi, N. R., Awaluddin, M., Widodo, A., Sumon, M. A. A., Jamal, M. T., & Santanumurti, M. B. (2023). *Recirculating aquaculture system (RAS) towards emerging whiteleg shrimp (Penaeus vannamei) aquaculture*. *International Aquatic Research*, 15(1), 1–14. <https://doi.org/10.22034/IAR.2023.1973316.1361>
- Prosser, J. I., & Nicol, G. W. (2018). *Archaeal and bacterial ammonia-oxidisers in soil: The quest for niche specialization and differentiation*. *Trends in Microbiology*, 26(2), 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2018.02.002>
- Review of state-of-the-art improvements in recirculating aquaculture systems: Insights into design, operation, and statistical modeling approaches*. (2025). *Aquaculture*, 605, 742545. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742545>
- Summerfelt, S. T., & Penne, C. R. (2017). *Design and management of biofilters*. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.04.003>
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2018). *Recirculating aquaculture systems (4th ed.)*. Cayuga Aqua Ventures.
- van Rijn, J. (2017). *Waste treatment in recirculating aquaculture systems*. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.05.002>
- Wang, Y., Deng, M., Zhou, S., Li, L., & Song, K. (2024). *Increasing fish production in recirculating aquaculture systems by integrating a biofloc-worm reactor for protein recovery*. *Water Research X*, 24, 100246. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100246>

Yang, Y., Liu, W., Li, X., & Fan, X. (2024). *Enhanced biofiltration coupled with ultrafiltration process in marine recirculating aquaculture system: Fast start-up of nitrification and long-term performance*. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104901>

Zhang, H., Mota, V. C., Striberny, A., Verstege, G. C., Difford, G. F., & Lazado, C. C. (2022). *Evaluation of a recirculating aquaculture system research facility designed to address current knowledge needs in Atlantic salmon production*. *Frontiers in Animal Science*, 3, 876504. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.876504>