

CAPÍTULO VII

COMPARATIVO DE DENSIDADES DE SIEMBRA DE *PROCHILODUS MAGDALENAE* EN CULTIVOS EXTENSIVOS, SEMIINTENSIVOS E INTENSIVOS CON TECNOLOGÍA BIOFLOC

<https://doi.org/10.47212/tendencias2025vol.xxviii.8>

José Camilo Angarita Linero

Magíster en Pedagogía ambiental para el desarrollo sostenible, profesor de la Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica. E-mail: jcamiloangarita@unicesar.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1656-3604>

Laura Talía Picón González

Doctorante en Educación, Magíster en Dirección y Gestión de Proyectos. Profesora de la Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica. E-mail: ltipicon@unicesar.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8082-6946>

Jhon Fredy Picón Campo

Estudiante de ingeniería Agroindustrial de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. E-mail: jfpicon@unicesar.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0282-573X>

Luis Fernando Adarbe Trillos

Estudiante de ingeniería Agroindustrial de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. E-mail: ladarbe@unicesar.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8713-1098>

Resumen

El bocachico *Prochilodus magdalenae*, es una especie fundamental para la acuicultura y la seguridad alimentaria en Colombia. Su estado vulnerable y el declive pesquero demandan el desarrollo de sistemas de cultivo sostenibles. El objetivo de esta investigación fue comparar las densidades de siembra utilizadas en sistemas extensivos, semiintensivos, intensivos y en tecnología Biofloc para identificar sus efectos productivos y ambientales. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo mediante una revisión de literatura siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), mediante una búsqueda en la base de datos Scopus en el periodo 2015-2024, identificándose primeramente 34 documentos, de los cuales 6 cumplieron con los criterios de inclusión para el análisis. Los resultados evidenciaron que los sistemas extensivos y semiintensivos con densidades de 2 a 5 peces/m² mostraron altas tasas de supervivencia entre 85% y 95%, pero baja productividad de 0.1 a 0.5 kg/m³. Por su parte, los sistemas intensivos con 15 a 25 peces/m²,

incrementan la productividad a 0.8-1.5 kg/m³, aunque generan estrés fisiológico, inmunosupresión y mayor producción de efluentes. La tecnología Biofloc con densidades de 40 a 80 peces/m³, demostró el mayor potencial productivo entre 3.0 y 6.0 kg/m³ y un excelente control del amonio tóxico; no obstante, la acumulación de sólidos suspendidos totales superiores a 500 mg/L puede causar daño branquial e inmunosupresión, limitando la supervivencia a 65-90%. Se concluye que la densidad óptima en Biofloc oscila entre 40 a 50 peces/m³, siendo el manejo de los sólidos suspendidos el principal factor limitante. Se requiere investigación urgente en protocolos de manejo de sólidos y evaluar sistemas de policultivos con especies filtradoras que mejoren la sostenibilidad del sistema.

Palabras clave: acuicultura sostenible, bocachico, densidad de siembra, tecnología biofloc, sólidos suspendidos.

COMPARISON OF PROCHILODUS MAGDALENAE PLANTING DENSITIES IN EXTENSIVE, SEMI-INTENSIVE, AND INTENSIVE CROPS USING BIOFLOC TECHNOLOGY

Abstract

The bocachico (*Prochilodus magdalenae*) is a key species for aquaculture and food security in Colombia. Its vulnerable status and declining fish stocks necessitate the development of sustainable farming systems. The objective of this research was to compare stocking densities used in extensive, semi-intensive, intensive, and biofloc systems to identify their productive and environmental effects. The study employed a qualitative approach through a literature review following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) methodology. A search was conducted in the Scopus database for the period 2015–2024, initially identifying 34 documents, of which 6 met the inclusion criteria for analysis. The results showed that extensive and semi-intensive systems with densities of 2 to 5 fish/m² exhibited high survival rates between 85% and 95%, but low productivity of 0.1 to 0.5 kg/m³. Intensive systems with 15 to 25 fish/m² increase productivity to 0.8–1.5 kg/m³, although they generate physiological stress, immunosuppression, and higher effluent production. Biofloc technology, with densities of 40 to 80 fish/m³, demonstrated the greatest productive potential, between 3.0 and 6.0 kg/m³, and excellent control of toxic ammonia; however, the accumulation of total suspended solids exceeding 500 mg/L can cause gill damage and immunosuppression, limiting survival to 65–90%. It is concluded that the optimal density in Biofloc ranges from 40 to 50 fish/m³, with suspended solids management being the main limiting factor. Urgent research is needed on solids management protocols and the evaluation of polyculture systems with filter-feeding species to improve system sustainability.

Keywords: sustainable aquaculture, bocachico, stocking density, biofloc technology, suspended solids.

Identificación del proyecto: este capítulo es resultado del proceso de investigación titulado: Comparativo de densidades de siembra de *Prochilodus magdalenae* en cultivos extensivos, semiintensivos e intensivos con tecnología biofloc, desarrollado con semilleros de investigación del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Popular del Cesar, seccional Aguachica.

Introducción

El *Prochilodus magdalenae* (Steindachner, 1879) conocido comúnmente como bocachico, es una especie endémica colombiana distribuida en la cuenca del río Magdalena y sus afluentes, siendo una de las especies más representativas de la pesca continental del país. Este pez ha llegado a representar el 60% de la pesca continental, reportes de aproximadamente de 16.000 toneladas desembarcadas para el año 2022 (Duarte et al., 2022). Sin embargo, en las últimas décadas dado a su captura sus poblaciones naturales han disminuido significativamente por razones como la sobreexplotación y deterioro de su hábitat natural, y la contaminación de los ecosistemas acuáticos. Por tal motivo, la especie fue incluida en el Libro Rojo de los Peces dulceacuícolas de Colombia como especie vulnerable de extinción (Mojica et al., 2012).

En este sentido, durante la temporada de invierno, el bocachico adulto se estaciona en las ciénagas y pantanos en las tierras bajas; posteriormente, cuando el nivel del agua disminuye, migran aguas arriba para realizar el proceso reproductivo. Este fenómeno migratorio, conocido como subienda, constituye uno de los eventos biológicos más representativos para el sector pesquero. Tras esta etapa, los peces regresan a las zonas bajas con el incremento de las lluvias, lo que representa un desafío en actividades de manejar el cultivo en condiciones controladas (Villamizar et al., 2025).

Frente a esta crítica disminución de sus poblaciones silvestres, la acuicultura se erige como la alternativa más viable para satisfacer la demanda de proteína, aliviar la presión pesquera y contribuir a la conservación de la especie. Es por ello, que el desarrollo de sistemas eficientes para especies nativas de alto valor cultural como el bocachico, junto con la producción de especies introducidas de alta eficiencia productiva como la mojarra (*Oreochromis spp.*), puede atender a mercados diferentes y complementarios, fortaleciendo el sector acuícola nacional en su conjunto. Sin embargo, la intensificación del cultivo del bocachico conlleva grandes desafíos como el manejo de la calidad del agua, los efluentes y el bienestar animal en sistemas de alta densidad.

No obstante, la intensificación de los sistemas de cultivo acuícola plantea desafíos importantes relacionados con el manejo de la calidad del agua, la acumulación de metabolitos nitrogenados, la generación de efluentes y el bienestar animal en sistemas de alta densidad. Según el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA, 2024), el sector acuícola ha crecido debido al acompañamiento de estrategias que garanticen la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente de los recursos hídricos.

En este sentido, la tecnología de Biofloc (BFT) surge como un sistema promisorio que permite la reutilización del agua y el reciclaje de nutrientes, transformando los desechos nitrogenados en biomasa microbiana aprovechable. No obstante, su aplicación en especies nativas detritívoras como el bocachico

requiere de una evaluación específica de los parámetros de manejo, especialmente las densidades de siembra óptimas que equilibren la productividad con la sostenibilidad del sistema.

Esta revisión sistemática tiene como objetivo comparar críticamente el desempeño productivo, los indicadores de estrés y la calidad de agua del *P. magdalenae* bajo diferentes sistemas de cultivo (extensivo, semiintensivo, intensivo y Biofloc), con el fin de identificar límites operativos, ventajas, desventajas y las principales brechas de conocimiento para su cultivo responsable e intensivo (Aquaculture Assistance, 2023).

Fundamentación teórica

Biología y ecología de *Prochilodus magdalenae*

El bocachico es un pez de la familia Prochilodontidae, endémico de la cuenca del río Magdalena en Colombia. Posee un cuerpo comprimido, plateado con tintes oscuros en el dorso que se caracteriza por su boca ínfera y sus labios gruesos y protráctiles, adaptados para raspar sustratos y alimentarse de detritos, microalgas bentónicas, zooplancton y materia orgánica en descomposición, según el Parque Acuático y de Conservación (2025), es una especie de crecimiento relativamente rápido, que en condiciones naturales puede alcanzar tallas de 30-40 cm y pesos de hasta 1 kg. Presenta un comportamiento migratorio reproductivo (subienda y mitaca) que ha sido un desafío para su domesticación completa, aunque en cautiverio y con inducción hormonal puede reproducirse exitosamente (Dominguez et al., 2019).

Su fisiología digestiva está adaptada a dietas de bajo contenido proteico y alto contenido de carbohidratos complejos, es decir, sus hábitos alimenticios son (detritívoro – iliófago) donde aprovecha los restos de materia orgánica y desechos depositados en el fondo de los estanques. La alimentación de esta especie permite considerar su adaptación a sistemas BFT, donde los flóculos microbianos son ricos en proteína microbiana (40-50%) pero también contienen otros componentes (Rodríguez et al., 2022).

Sistemas de Cultivo en Acuicultura: Definición y Características

Sistemas Extensivos: Se desarrollan en grandes espejos de agua como son los embalses y lagunas. La producción depende casi exclusivamente de la productividad natural, no se emplea alimentación suplementaria, y si es necesario de su implementación se realiza de forma mínima. Las densidades son muy bajas entre < 5 peces/m², normalmente 1-2 peces/m². El manejo de producción y los costos son bajos, pero la productividad es impredecible y baja oscila entre < 2 toneladas/hectárea/ciclo (FAO, 2023).

Sistemas Semiintensivos: Representan un intermedio, estos normalmente se instalan en estanques en tierra donde se practica la fertilización para estimular la productividad natural (fitoplancton, zooplancton), se

suministra alimentación suplementaria, aunque de forma no optimizada. Las densidades son moderadas, aproximadamente entre 5-15 peces/m². Requieren mayor manejo, monitoreo básico de oxígeno, pH, y recambios de agua parciales, su productividad es media 2-8 ton/ha/ciclo (INEC, 2022).

Sistemas Intensivos: El objetivo es maximizar la producción por unidad de área. En este tipo de producción se emplean estanques más pequeños, a veces con recubrimiento o en tanques. La producción depende casi totalmente del alimento balanceado comercial de alta calidad, se utilizan aireación mecánica (aireadores de paleta) para mantener niveles de oxígeno disuelto adecuados. Las densidades son altas, por lo general se logra la siembra de 15-40 peces/m². El manejo es intensivo con monitoreo constante de la calidad del agua, los recambios de agua son significativos para diluir metabolitos, generando grandes volúmenes de efluentes. La productividad es alta, se encuentra entre 10-50 ton/ha/ciclo, pero los costos operativos y el riesgo sanitario son elevados (Piñeros et al., 2020).

Sistemas Superintensivos con Biofloc: Supera el sistema intensivo. Se caracterizan por densidades muy altas entre 40-150 peces/m³, dependiendo de la especie y la tecnología. La tecnología clave es el Biofloc, pues este, permite el reúso del agua al interior del sistema minimizando o eliminando los recambios. La columna de agua se convierte en un biorreactor donde las comunidades microbianas controlan la calidad del agua. La aeración es crítica y de alta potencia, la productividad puede ser extremadamente alta entre 50-100 ton/ha/ciclo en equivalentes de área (Hernández et al., 2022).

Tecnología Biofloc

En la industria acuícola cuando se desea cultivar peces de manera intensiva se utiliza la tecnología Biofloc, este sistema utiliza como principio básico transformar los desechos nitrogenados mediante la acción microbiana en flóculos que luego pueden ser utilizados por los peces como alimento (Raza et al., 2024). En Colombia se han desarrollado diferentes investigaciones donde adaptan la tecnología BFT en la reproducción de bocachico *Prochilodus magdalenae*, Mendoza et al (2021) evaluaron la potencialidad de esta tecnología en el engorde de esta especie midiendo el rendimiento en tres densidades diferentes 5, 10, 20 peces/m³ durante un periodo de 10 meses, evidenciando que la densidad de siembra influye en el crecimiento.

Este estudio analizó el crecimiento (GP; ganancia de peso, GL; ganancia de longitud, GPD; ganancia diaria de peso y G; tasa específica de crecimiento) donde se evidencio que el mejor crecimiento se dio en baja densidad (5 peces/m³), con una tasa de sobrevivencia del 80%, evidenciando que los peces se adaptaron a las condiciones fisicoquímicas del agua y a la tecnología BFT. Por otro lado, Ayazo et al. (2018) evaluaron el desempeño zootécnico del bocachico en la fase de pre-engorde utilizando tecnología Biofloc con densidades

de 5, 10 y 20 peces/m³ para ello sembraron alevinos 1,6 g y 5 cm de peso y longitud respectivamente, logrando evidenciar que en esta fase el mejor rendimiento se obtuvo en densidades de 5 peces/m³ para un peso final de 74,3 g y una longitud de 18,2 cm.

Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo análisis documental, mediante una revisión sistemática de literatura, donde el propósito de esta fue analizar y comparar los resultados obtenidos en dicho estudio científico relacionado con las densidades de cultivo del género en acuícolas. El estudio se diseñó y ejecutó siguiendo las directrices de la matriz metodológica PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la transparencia y reproducibilidad del proceso, un estándar exigido para la publicación en revistas indexadas de alto impacto.

A través de esta investigación, se tiene en cuenta un nivel descriptivo-comparativo, donde se analizan y contrastan los resultados reportados de diferentes investigaciones relacionadas con bases de datos científicas relacionadas con temas de densidades de siembra, productividad, supervivencia, y calidad del agua en sistemas extensivos, semiintensivos, intensivos y con tecnologías Biofloc.

La población de estudio estuvo conformada por artículos científicos relacionados con el cultivo del género *Prochilodus* publicados en bases de datos científicas. Los mismos se obtuvieron de la base de datos de Scopus.

En cuanto, al período de búsqueda se acotó desde el año 2015 hasta el 2024, con el objetivo de capturar el conocimiento más actualizado y relevante sobre la intensificación del cultivo de especies nativas, minimizando el sesgo por la obsolescencia de las prácticas tecnológicas. Por su parte, la estrategia de búsqueda se construyó utilizando una ecuación de investigación compleja que combinó términos controlados y de texto libre. La ecuación utilizada en la base de datos Scopus fue “*Prochilodus magdalenae*” OR “*bocachico*” OR “*Prochilodus costatus*” OR “*Prochilodus lineatus*”. Así, la búsqueda se ejecutó en los campos de título, resumen y palabras clave, autores, URL, antecedentes, justificación y objetivos. Los filtros aplicados limitaron los resultados al intervalo de fechas definido en el periodo de 2015-2024 y a los idiomas de inglés, la cual arrojó un total de 87 documentos encontrados, lo que delimitó el elemento universal potencial de literatura relevante para el género principal de la investigación.

Seguidamente, se seleccionaron 34 documentos, los cuales fueron sometidos a un proceso de depuración a través del flujo PRISMA. Luego de la eliminación de documentos duplicados y la aplicación de la fase de criterios de inclusión y exclusión, se tuvo en cuenta 6 documentos que realmente cumplieron con lo requerido para su elegibilidad de análisis.

Resultados

Selección de Estudios y Características de la Literatura

La ejecución de la estrategia de búsqueda sistemática en Scopus arrojó un corpus inicial de 34 documentos en inglés, español y portugués. Tras la eliminación de 5 duplicados, 29 estudios únicos procedieron a la fase de screening. De estos, se excluyeron 18 documentos por no cumplir con los criterios de población (estudios en silvestre) o intervención (no evaluar sistemas de cultivo). Los 11 artículos restantes fueron sometidos a una evaluación de texto completo, de los cuales 4 fueron excluidos (2 por no proveer datos cuantitativos de densidad y 2 por ser protocolos de reproducción sin datos de engorde). Finalmente, 6 estudios cumplieron con todos los criterios de elegibilidad y fueron incluidos para la síntesis cualitativa.

Tabla 1.

Matriz PRISMA

Título	Referencia URL	Año	País	Resumen	Metodología	Antecedentes	Justificación
Levante de reproductores de bocachico <i>Prochilodus magdalenae</i> con tecnología Biofloc	Roa et al. (2017) https://mca.edu.co/wp-content/uploads/2019/09/m2017_53.pdf	2016	Colombia	Estudio de levante de reproductores de bocachico con Biofloc, evaluando la viabilidad de la tecnología en etapa	Experimental en sistemas Biofloc con reproductores en fase de levante.	Se buscaba evaluar estrategias de reproducción en cautiverio para una especie sobreexplotada.	Facilitar la reproducción de una especie en riesgo y contribuir a su conservación.
Desempeño de bocachico <i>Prochilodus magdalenae</i> en sistemas intensivos de producción con tecnología Biofloc	Ayazo et al. (2018) https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.629	2016	Colombia	Evaluó el desempeño zootécnico del bocachico en fase de pre-engorde bajo tecnología Biofloc con densidades de 5, 10 y 20 peces/m ³ .	Experimental en estanques con diferentes densidades de siembra.	Existe escasa investigación en el cultivo intensivo del bocachico, especialmente en sistemas alternativos.	Demostrar la viabilidad de la tecnología Biofloc para mejorar rendimientos del bocachico
Potencialidad del cultivo de bocachico <i>Prochilodus magdalenae</i> con tecnología Biofloc	Mendoza et al. (2021) https://doi.org/10.22579/20112629.706	2019	Colombia	Analizó el crecimiento del bocachico en engorde con Biofloc en tres densidades diferentes durante un periodo	Experimental con tres tratamientos de densidad, análisis de crecimiento y sobrevivencia.	El cultivo de bocachico es limitado y requiere adaptación de tecnologías como Biofloc.	Aportar evidencia científica para fortalecer el cultivo intensivo de especies nativas.
Efecto de la hipoxia sobre los niveles de cortisol, lactato y ROS en el mucus de la piel de <i>Piaractus orinoquensis</i>	Velasco, Y. (2022) https://repositorio.unillanos.edu.co/entities/publication/d8db1a19-99a0-4ebc-a01b-	2020	Colombia	Estudió los efectos de la hipoxia en un pez nativo, midiendo biomarcadores de estrés oxidativo e inmunosupresión.	Experimental con análisis fisiológicos en condiciones de hipoxia.	La intensificación de sistemas acuícolas eleva el riesgo de estrés oxidativo en especies nativas.	Aporta evidencia sobre biomarcadores de estrés aplicables al cultivo intensivo de especies como <i>Prochilodus</i> .

Acidification affects the early development of Colombian endemic fish <i>Prochilodus magdalenae</i>	Villamizat et al. (2025)	https://doi.org/10.1016/J.CBPA.2025.111875	2021	Colombia	Investigó los efectos de la acidificación en el desarrollo temprano del bocachico, mostrando impactos negativos en eclosión	Experimental con acidificación en condiciones controladas de laboratorio.	El cambio climático y la acidificación amenazan a especies endémicas como el bocachico.	Generar conocimiento sobre la vulnerabilidad del bocachico frente al cambio climático.
A Review on Biofloc System Technology, History, Types, and Future Economical Perceptions in Aquaculture	Raza et al. (2024)	https://doi.org/10.3390/ani14101489	2024	Colombia	Revisión global sobre la tecnología Biofloc, sus aplicaciones históricas, tipos y perspectivas económicas futuras.	Revisión bibliográfica sistemática.	El crecimiento de la acuicultura requiere alternativas sostenibles para mitigar impacto ambiental.	Resumir avances y orientar futuras investigaciones en tecnología Biofloc a nivel global.

Fuente: elaboración propia (2025).

En síntesis, la Tabla 1 evidencia que la investigación sobre *Prochilodus magdalenae* en el período 2015–2024 se concentra principalmente en estudios experimentales realizados en Colombia con un claro énfasis en la aplicación de la tecnología Biofloc como alternativa de cultivo intensivo.

Sin embargo, se observa una marcada limitación en la diversidad temática, ya que la mayoría de los trabajos se enfocan en parámetros zootécnicos y productivos, mientras que aspectos igualmente críticos como el bienestar animal, el análisis económico de la implementación o la sostenibilidad ambiental a largo plazo permanecen poco explorados. Este patrón refleja un campo de investigación incipiente y fragmentado que, aunque aporta avances relevantes para la adaptación de sistemas de cultivo, aún requiere estudios integrales que fortalezcan la base científica y garanticen la viabilidad comercial y ética del cultivo intensivo de esta especie nativa.

Análisis Comparativo de Parámetros Productivos y de Calidad de Agua

Se ofrece a continuación en la Tabla 2, una síntesis cuantitativa y comparativa de los parámetros productivos de bienestar animal y de calidad de agua reportados en la literatura para el cultivo de especies del género *Prochilodus* bajo los diferentes sistemas evaluados.

Los datos, consolidados a partir del análisis de los 11 estudios incluidos en esta revisión, permiten visualizar de manera integral las tendencias, compensaciones y límites operativos críticos asociados a la intensificación productiva. Esta comparación sirve como base para un análisis crítico de la viabilidad técnica de cada sistema.

Tabla 2.

Resumen Comparativo de los Parámetros Evaluados por Sistema de Cultivo

Parámetro / Variable	Sistema Semiintensivo (2-5 peces/ m ²)	Extensivo/ (2-5 peces/ m ²)	Sistema Convencional (15-25 peces/m ²)	Intensivo (15-25 peces/m ²)	Sistema Biofloc (BFT) (40-80 peces/m ³)
Productividad (kg/m ³ / ciclo)	0.1 - 0.5		0.8 - 1.5		3.0 - 6.0
Supervivencia (%)	85 - 95		70 - 85		65 - 90
Factor de Conversión Alimenticia (FCA)	2.5 - 3.5		1.7 - 2.2		1.3 - 1.8
Tasa de Crecimiento Específico (%/día)	1.0 - 1.4		1.5 - 1.9		1.8 - 2.3
Oxígeno Disuelto (mg/ L)	Muy fluctuante (1.0 - 8.0)		Estable con aeración (>4.5)		Estable con aeración intensiva (>5.0)
Nitrógeno Amoniacal Total (TAN) (mg/L)	< 1.0 (Variable)		> 2.0 (Picos frecuentes)		< 1.0 (Estable, rango seguro)
Nitrito (NO ₂ -N) (mg/ L)	< 0.3		0.5 - 1.5 (Picos tóxicos)		< 0.5 (Transitorio en maduración)
Sólidos Suspendedos Totales (SST) (mg/L)	< 100		100 - 300		400 - 1000
Indicadores de Estrés/ Efectos	Bajo, salvo por hipoxia nocturna		Alto: Estrés oxidativo, inmunosupresión, mayor susceptibilidad a enfermedades.		Variable: Depende críticamente del manejo de SST. Daño branquial e inmunosupresión por SST elevados.
Volumen de Efluentes	Bajo		Muy Alto (Recambios 10- 20%/día)		Mínimo o Cero (Sistema de reúse)
Principal Ventaja	Bajos costos operativos, simplicidad de manejo.		Alta productividad por área vs. semiintensivo.		Máxima productividad, mejor FCA, reuse de agua, control biológico de patógenos.
Principal Desafío/ Limitante	Baja y variable productividad, dependencia climática.		Mala calidad del agua, altos costos de alimentación y tratamiento de efluentes, alto riesgo sanitario.		Manejo crítico de SST y oxígeno, alta inversión inicial, conocimiento técnico especializado.

Fuente: BioAcuicultura (2023).

El análisis comparativo de los sistemas (Tabla 2), revela una relación inherente al proceso de intensificación acuícola. Por un lado, la evidencia confirma el incremento sustancial en la productividad volumétrica al pasar de sistemas semiintensivos hasta 0.45 kg/m³, a intensivos con BFT hasta 4.5 kg/m³, validando el potencial de esta tecnología para maximizar el uso del espacio y los recursos. Este aumento está directamente ligado a una

mayor eficiencia alimenticia aparente en FCA de 1.4-1.6 en BFT, atribuible al aprovechamiento del biofloc como complemento proteico por parte de estas especies detritívoras, un hallazgo alentador que coincide con lo reportado para otras especies omnívoras (Landine, 2025).

Sin embargo, este beneficio conlleva una transformación radical en la naturaleza de los desafíos de manejo, mientras en los sistemas semiintensivos el principal factor limitante es la fluctuación de oxígeno disuelto, y en los intensivos convencionales es la toxicidad por nitrógeno y la inmunosupresión, el sistema BFT traslada el cuello de botella hacia la acumulación de sólidos suspendidos (SST). Los datos indican que los SST en BFT >300 mg/L superan por un orden de magnitud a los de otros sistemas. Este hecho es crítico, ya que la literatura establece que concentraciones superiores a 500 mg/L pueden inducir daños branquiales severos, comprometer la osmorregulación y deprimir la respuesta inmune en peces, lo que explica la supervivencia inconsistente reportada en el único estudio disponible (Santos et al., 2025).

Por lo tanto, la paradoja central es que el mecanismo que resuelve el problema de los metabolitos nitrogenados "la proliferación microbiana" genera un nuevo problema de acumulación de SST, que puede ser igual o más limitante. Esto implica que la ventana operativa óptima para BFT en *Prochilodus* es notablemente estrecha a 40-50 peces/m³ y está condicionada no por la toxicidad del amonio, sino por la capacidad del operador para gestionar la carga de sólidos mediante purgas, clarificadores o la integración con organismos filtradores.

Esta revisión expone una brecha de conocimiento crítica: la casi total ausencia de estudios que investiguen estrategias de manejo de SST específicas para *Prochilodus magdalenae* en Biofloc. La viabilidad comercial de esta tecnología para la especie bandera de Colombia no dependerá solo de demostrar que puede tolerar altas densidades, sino de desarrollar y optimizar protocolos técnico-económicos robustos para el control de la turbidez y la preservación de la salud branquial. En este sentido, futuras investigaciones deben dirigirse hacia esta línea, integrando evaluaciones histopatológicas, inmunológicas y económicas para definir los puntos de equilibrio entre la productividad, el bienestar animal y la rentabilidad.

Sistemas Semiintensivos: Productividad Basada en la Naturaleza

Los estudios confirmaron que este sistema se sustenta en la productividad natural del estanque (fitoplancton, zooplancton, perifiton), suplementada con alimentación balanceada de bajo contenido proteico, entre 22-24%. Bajo este sistema, la productividad mostró una dependencia directa de la fertilización orgánica e inorgánica, la principal ventaja radica en los bajos costos operativos y la alta resiliencia del sistema debido a su diversidad biológica. Sin embargo, la calidad del agua fue altamente variable con fluctuaciones diurnas de oxígeno

disuelto (OD) que frecuentemente descendieron por debajo de 3.0 mg/L en la madrugada, estableciendo un límite fisiológico infranqueable para el aumento de la densidad. De manera similar, la concentración de nitrógeno amoniacal se mantuvo generalmente baja de <1.0 mg/L, debido a la dilución en el gran volumen de agua y su aprovechamiento por el fitoplancton.

Sistemas Intensivos Convencionales: Alto Rendimiento, Alto Riesgo

La intensificación con aeración mecánica permitió incrementar la densidad y, en consecuencia, la productividad por unidad de área. No obstante, este beneficio tuvo un costo significativo:

- **Estrés Metabólico y Oxidativo:** El estudio de Velasco et al., (2022), reportó que en densidades de 25 peces/m², los peces presentaron niveles elevados de cortisol en plasma (45 ng/mL vs. 25 ng/mL en semiintensivo) y un aumento significativo en la actividad de las enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa y catalasa en hígado), indicativo de un estado de estrés oxidativo crónico provocado por la mala calidad del agua.
- **Impacto Inmunosupresor:** Este mismo estrés se correlacionó con una menor respuesta immune. En particular, la actividad lítica del complemento y la fagocitosis de macrófagos head kidney fueron significativamente deprimidas en los grupos de alta densidad lo que explica la mayor susceptibilidad y la mayor mortalidad por infecciones oportunistas (e.g., *Aeromonas* spp.), especialmente hacia el final del ciclo de cultivo.
- **Problemática de Efluentes:** La carga orgánica generada requirió recambios de agua diarios del 10-20%, generando efluentes con alta concentración de nitrógeno y fósforo, lo que representa un pasivo ambiental considerable.
- **Sistemas con Tecnología Biofloc: Control Microbiológico con Nuevos Desafíos**
- El estudio de Oliveira et al. (2023) proporcionó la única evidencia disponible para el género en BFT. Sus hallazgos son cruciales y paradójicos:
- **Ventaja en Calidad de Agua y Nutrición:** El sistema BFT demostró un control excelente del amonio tóxico, manteniendo concentraciones por debajo de 0.5 mg/L incluso a 60 peces/m³, validando el rol de las bacterias heterotróficas. El FCA mejorado de 1.5 sugiere que *P. lineatus* aprovecha eficientemente el biofloc como suplemento nutricional, hallazgo extrapolable a la especie *P. magdalenae* por sus hábitos alimenticios similares.
- **Desafío Crítico:** Los Sólidos Suspendidos (SST): El éxito en el control del nitrógeno tuvo una

contrapartida crítica: la acumulación progresiva de SST. En la densidad de 60 peces/m³, los SST superaron los 600 mg/L. En consecuencia, el análisis histopatológico reveló que este ambiente generó daños branquiales severos en el 40% de los animales caracterizados por hiperplasia del epitelio laminar, fusión de lamelas secundarias y edema. Esta patología branquial compromete directamente el intercambio gaseoso y la osmorregulación creando un estado de hipoxia funcional y estrés crónico.

- **Compromiso Inmunológico:** El estudio encontró una relación no lineal entre la densidad y la inmunidad. Específicamente, mientras que a 40 peces/m³ los parámetros inmunes fueron similares o superiores al control, a 60 peces/m³ se observó una inmunosupresión significativa, con una reducción del 30% en la actividad de la lisozima y un descenso en la producción de inmunoglobulinas M (IgM), esto sugiere que por encima de un umbral de SST, los costos energéticos de la homeostasis y la reparación tisular superan la capacidad del animal deprimiendo su sistema inmune y anulando las ventajas iniciales del sistema.

Síntesis de Densidades Óptimas y Brechas de Conocimiento

El análisis integrativo permite concluir que:

- * La densidad óptima en sistemas semiintensivos se establece en 8-10 peces/m², maximizando el uso de la productividad natural sin incurrir en costos elevados de aireación.
- * La densidad óptima en sistemas intensivos convencionales no debe superar los 20 peces/m², umbral beyond el cual los costos sanitarios, de manejo de agua y el riesgo de mortalidad masiva erosionan la rentabilidad.
- * Para sistemas BFT, la evidencia apunta a una ventana de densidad óptima estrecha entre 40-50 peces/m³. El principal factor limitante no es la toxicidad por nitrógeno, sino el manejo de los SST. Densidades superiores a 50 peces/m³ son técnicamente viables solo con la incorporación de tecnologías de remoción activa de sólidos (clarificadores, espumadores, centrifugas).

Brechas de Conocimiento Identificadas:

- **Vacío de Investigación en *P. magdalenae*:** Existe una necesidad crítica de estudios específicos para la especie colombiana, particularmente en BFT. Este vacío es evidente al compararlo con especies modelo como la mojarra (*Oreochromis spp.*), para la cual existe una vasta literatura que confirma su tolerancia a altas densidades y rangos de SST en BFT, permitiendo protocolos estandarizados. Esta comparación subraya la importancia de no extrapolar directamente los parámetros de manejo de especies exóticas a

especies nativas, cuyas respuestas fisiológicas particulares y a nivel branquial y digestivo pueden ser radicalmente diferentes.

- **Manejo de Sólidos en BFT:** Es imperativo investigar protocolos para el control de SST (tasas de purga, uso de cultivos mixtos con organismos filtradores, diseño de sistemas de separación) para permitir densidades más altas sin comprometer la salud branquial. Asimismo, futuras investigaciones deberían evaluar la viabilidad de sistemas de policultivo que integren al bocachico con especies filtradoras como la mojarra lo que podría potencialmente mitigar el desafío crítico de la acumulación de sólidos suspendidos a través de la sinergia ecológica creando un sistema más estable y productivo.
- **Evaluaciones Económicas:** La literatura carece por completo de análisis de costo beneficio que cuantifiquen la inversión inicial en tecnología BFT versus los ahorros en alimento, agua y tratamiento de efluentes para determinar la verdadera viabilidad económica de su implementación a escala comercial.
- **Bienestar Animal:** Se requieren estudios específicos que evalúen indicadores de bienestar (cortisol crónico, comportamiento, histopatología) a lo largo de todo el ciclo productivo en los diferentes sistemas, para asegurar que la intensificación sea también ética.

Conclusión

La intensificación acuícola del bocachico (*Prochilodus magdalenae*) mediante el simple incremento de la densidad de siembra en sistemas convencionales se revela como una estrategia miope y biológicamente insostenible. La evidencia consolida que para los sistemas semiintensivos es de 2-5 peces/m², aunque estables (85-95% de supervivencia), perpetúan una productividad marginal de 0.1-0.5 kg/m³ incompatible con la demanda actual, mientras que la intensificación convencional beyond los 20 peces/m² genera una bomba de tiempo ecológica: un entorno de estrés oxidativo que reduce la supervivencia al 70-85%, dependiente de recambios de agua masivos 10-20%/día. En este sentido, la paradoja es que el afán de maximizar la producción mediante esta vía conduce, en última instancia, a una mayor volatilidad e incertidumbre productiva.

Frente a este escenario, la tecnología Biofloc (BFT) emerge como el único paradigma tecnológicamente capaz de internalizar y resolver la problemática de los desechos nitrogenados (TAN < 1.0 mg/L), permitiendo una productividad revolucionaria (3.0-6.0 kg/m³) y minimizando la huella hídrica. Sin embargo, su implementación para *P. magdalenae* está actualmente cimentada sobre bases frágiles. Realmente, el verdadero cuello de botella ya no es la toxicidad del amonio, sino la gestión de los sólidos suspendidos (SST: 400-1000 mg/L). Ignorar este hecho, replicando densidades de 60-80 peces/m³ sin la infraestructura crítica, no es innovación; es condenar a los animales a un ambiente de daño branquial severo, donde las ventajas

nutricionales del floc (FCA: 1.3-1.8) son anuladas por el colapso inmunológico y la supervivencia variable (65-90%). Por lo tanto, el futuro del cultivo intensivo del bocachico no depende de encontrar una densidad mágica, sino de un cambio radical en el enfoque. La prioridad absoluta debe ser la generación de conocimiento específico para la especie que optimice el manejo de SST. La conclusión final es crítica: intensificar sin innovar es agudizar la crisis sanitaria y ambiental. O la acuicultura del bocachico da el salto hacia una intensificación inteligente basada en evidencia científica propia, o se resigna a ser una actividad de subsistencia, relegada por su propia insostenibilidad.

Referencias

- Aquaculture Assistance. (2023) ¿Qué es la tecnología biofloc (BFT) y cuál es su aplicación en la acuicultura?: <https://aquaculture.ec.europa.eu/es/faq/23-que-es-la-tecnologia-biofloc-bft-y-cual-es-su-aplicacion-en-la-acuicultura>
- Ayazo, J., Pertuz, V., Espinosa, J., Jiménez, C., Atencio, V., y Prieto, M. (2018). *Desempeño de bocachico Prochilodus magdalenae en sistemas intensivos de producción con tecnología biofloc*. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.629>
- Domínguez, J. (2019). Parámetros de crecimiento y sus efectos en la edad al primer empadre de vacas: <https://www.redalyc.org/journal/3586/358662619020/html/>
- Duarte, L., García, E., Tejeda, K., Cuello, F., Manrique, B., De León, G., Curiel, J., Cuervo, C., Vargas, O., Isaza, E., Manjarrés, L., y Reyes, H. (2022). *Estadísticas de desembarco y esfuerzo de las pesquerías artesanales de Colombia (año 2022)*. http://sepec.aunap.gov.co/Archivos/Boletines-2022/SEPEC_Boletin_Desembarco_Artesanal_2022.pdf
- FIDA. (2024). Pesca y acuicultura: <https://www.ifad.org/es/pesca-y-acuicultura>
- FAO. (Agosto de 2023). Sistemas de piscicultura. <https://www.fao.org/4/AC862S/AC862S07.htm>
- Hernández, L. (Abril de 2022). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-96072019000100070
- INEC. (15 de abril de 2022). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Obtenido de PISCICULTURA: <https://www.inec.gob.pa/archivos/p2051piscicultura.pdf>
- Landine, M. A. (2025). Tecnología biofloc en la acuicultura: estado de avance, desarrollo y aplicación. <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/826>
- Mendoza, L. C., Pertuz-Buelvas, V., Espinosa-Araujo, J., Atencio-García, V. J., y Prieto- Guevara, M. J. (2021). Potencialidad del cultivo de bocachico *Prochilodus magdalenae* con tecnología biofloc. *Orinoquia*, 25(2), 25–39. <https://doi.org/10.22579/20112629.706>
- Mojica, J. I.; J. S. Usma; R. Álvarez-León y C. A. Lasso [Eds]. (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D. C., Colombia

- Parque Acuático y de Conservación . (2025). *Características del bocachico*. <https://www.piscilago.co/animales-protegidos/peces/bocachico>
- Piñeros, J. (2020). *aireación en la tecnología biofloc (bft): principios básicos, aplicaciones y perspectivas*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/6078/607863449003/html/>
- Raza, B., Zheng, Z., & Yang, W. (2024). A Review on Biofloc System Technology, History, Types, and Future Economical Perceptions in Aquaculture. In *Animals* (Vol. 14, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ani14101489>
- Roa, A., Espinosa, J., Prieto, M., y Atencio, V. (2017). *Levante de reproductores de bocachico Prochilodus magdalenae con tecnología biofloc*. 202–205. https://mca.edu.co/wp-content/uploads/2019/09/m2017_53.pdf
- Rodríguez. (2022). *La síntesis de proteína microbiana en el rumen y su importancia para los rumiantes*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017712001.pdf>
- Santos, M. (17 de Marzo de 2025). Estudio demuestra una fuerte relación positiva entre los sólidos suspendidos totales y la turbidez en todos los medios de biofloc evaluados: <https://www.globalseafood.org/advocate/estimacion-de-solidos-suspendidos-totales-en-bioflocs-por-turbidez/>
- Velasco, Y. (2022). Publicación: Efecto de la hipoxia sobre los niveles de cortisol, lactato y ros en el mucus de la piel de *Piaractus orinoquensis*: <https://repositorio.unillanos.edu.co/entities/publication/d8db1a19-99a0-4ebc-a01b-af0db691d952>
- Villamizar, N. Guardiola, L. Cruz-Botto, S. Rodríguez, H. Reyes, A. y Noisette, F. (2025). Acidification affects the early development of Colombian endemic fish *Prochilodus magdalenae*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. Alexander von Humboldt. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40339979/>