



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

“Producción de *Oreochromis niloticus* con tecnología biofloc: Estudio de revisión”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICA VETERINARIA ZOOTECNISTA

PRESENTA:

BRENDA CAROLINA GUILLÉN VICARIO.

31230841-8

Asesora:

MVZ. EPA. María de la Luz Chavacán Avila

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia Vicario por haberme colmado de amor, respaldo y buenos ejemplos; por acompañarme en todos los proyectos que emprendo, por tomar mi mano en los retos que enfrento, por enseñarme a dar siempre lo mejor de mí y por ser una fuente inagotable de admiración y orgullo. Especialmente, agradezco a mi mamá, la estrella que me guía en la oscuridad, por la vida y la esperanza que me regala a diario, por mostrarme con fortaleza, decisión, bondad y cariño que todo es posible. A mis abuelos, a mis tías y tíos, por ser raíces y el fuerte tronco del árbol que me ha nutrido y sostenido. A papá y a mi hermano, por ayudarme a ver los diferentes matices que tiene la vida. Agradezco a todas nuestras mascotas, también miembros de la familia, por cuidarnos siempre, por toda la motivación y apoyo. Gracias, Cami, por ser mi guardiana incondicional y mi inspiración para estudiar Medicina Veterinaria; gracias, Renie, por estar a mi lado en los momentos más duros y por llenarme siempre de ternura y amor; gracias Tuna, Tita y Kramia, porque ustedes me han sanado con su magia de gato. Agradezco a mi compañero de vida, por ayudarme a cambiar la perspectiva que tengo de mí misma, a creer en mí y por acompañarme con paciencia en los buenos y malos momentos (¡Sí podemos!).

Agradezco a mis profesores y a mis entrenadores, que me han ayudado a formarme disciplinada y entusiasta, a definirme como la persona que soy; por mostrarme que la vida se conquista con pasión, perseverancia, empatía y esfuerzo; por darme las herramientas para lograr lo que me proponga y en muchos casos, darme la cuerda con la que me aferré a seguir viviendo. Agradezco en particular a la MVZ Luz Chavacán, por su magnífica labor docente y por toda la confianza y apoyo que me ha ofrecido desde que nos conocimos.

Agradezco a cada uno de mis amigos, porque han enriquecido a mi corazón y a mi mente, porque me han dado los mejores momentos a lo largo de mi vida académica y deportiva y porque gracias a ellos, el viaje ha valido la pena.

Tsú-tsú, todo esto es por ti y para ti, ¡no dejes de volar!

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. REVISIÓN SISTEMÁTICA.....	6
3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	7
3.1. Problemas principales a los que se enfrentan la acuicultura y pesca en México.....	7
3.2. Acuicultura y tecnología biofloc en México.....	9
3.3. Bases que sustentan la tecnología biofloc.....	12
3.4. Mantenimiento de la calidad del agua en el sistema biofloc.....	20
3.5. Tipos de biofloc.....	24
3.6. Desempeño productivo de <i>Oreochromis</i> spp. bajo sistema biofloc.....	25
3.7. Bienestar y biofloc.....	31
3.8. Medición del volumen de bioflóculos presentes en el agua y técnicas de observación de microorganismos.....	32
3.9. Microorganismos típicamente reportados en la Tecnología biofloc.....	33
3.9.1. Bacterias.....	35
3.9.2. Hongos y levaduras.....	40
3.9.3. Microalgas.....	40
3.9.4. Zooplancton.....	42
3.9.5. Nemátodos.....	43
3.10. Interacciones, funciones y sustratos sobre los que actúan los microorganismos en el sistema biofloc.....	44

3.11. Calidad nutricional de los bioflóculos.....	46
3.12. Ventajas de la tecnología biofloc sobre la acuicultura convencional.....	48
3.13. Desventajas de la tecnología biofloc.....	53
3.14. Conclusiones.....	57
3. REFERENCIAS.....	58
4. CUADROS.....	64

Resumen

GUILLÉN VICARIO BRENDA CAROLINA, Producción de *Oreochromis niloticus* con tecnología biofloc: Estudio de revisión. Asesorada por MVZ EPA María de la Luz Chavacán Avila.

Ante el contexto actual de acelerado crecimiento poblacional y consecuente demanda de alimentos de alta calidad nutricional, se requiere la búsqueda de alternativas de producción con mayor eficiencia, sustentabilidad y bioseguridad.

Durante años, la pesca ha contribuido a la satisfacción de las necesidades alimentarias a nivel mundial, sin embargo, ha sido explotada a niveles insostenibles. La acuicultura ha ofrecido la posibilidad de solucionar este problema y, dada la limitación de espacios y recursos, las tecnologías ahorradoras y altamente eficientes como la de biofloc cobran gran importancia.

Pese a que en el pasado los microorganismos presentes en los sistemas de producción acuícola eran considerados perjudiciales para los organismos de cultivo, actualmente funcionan como la base de esta tecnología, pues tienen el potencial de reciclar, reutilizar y transformar los residuos del sistema en nutrientes para los organismos cultivados a través de una compleja cadena trófica, reduciendo los costos de producción y los desechos generados por las producciones acuícolas.

Este estudio de revisión, cuya información fue recabada a través de la Biblioteca Digital de la UNAM, pretende describir el funcionamiento del sistema biofloc, los elementos que lo conforman y las técnicas utilizadas para la identificación de los microorganismos presentes en el mismo; clasificar los microorganismos reportados en los sistemas de producción con tecnología biofloc y abordar su importancia y funciones en el sistema, así como a nivel nutricional, señalando las similitudes encontradas en los diferentes estudios de tilapia consultados, así como las áreas en las que se requiere mayor investigación.

1. Introducción

En los años recientes, el aumento de la población mundial, la escasez de recursos y el aumento de contaminación han provocado problemas económicos, sociales y ambientales de gran magnitud (CMDRS, 2019; FAO, 2020). Tan solo en México hay más de 50 millones de personas en situación de pobreza o pobreza extrema (7.4%) y alrededor de 25.5 millones de personas carecen de acceso suficiente a la alimentación (CONEVAL, 2019). Debido a lo anterior, se han buscado fuentes de alimentos altamente nutritivos diferentes de la agricultura y la ganadería, cuya producción tenga la mayor eficiencia posible y sea sostenible, además de que genere empleos y oportunidades económicas, de manera que pueda satisfacer las necesidades alimentarias de la población en México y a nivel global, haciendo que la demanda del mercado de los productos acuáticos vaya en aumento (FAO, 2020). Ante esta exigencia, la intensidad con la que se ejerce la pesca de captura que en 2018 alcanzó la cifra récord a nivel mundial de 96.4 millones de toneladas (impulsada principalmente por la pesca de captura marina con 12.0 millones de toneladas), lo que supone un aumento del 5.4% respecto al promedio de los tres años anteriores (FAO, 2020). En este sentido, y debido a los avances científicos de los últimos 50 años se ha logrado mejorar ampliamente el conocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos a nivel mundial y se ha prestado especial atención a la sobreexplotación pesquera, dado el riesgo de agotar las especies de interés alimentario y comercial, incrementando con esto la conciencia sobre la importancia de gestionar los recursos pesqueros de forma responsable y sostenible (Cisneros-Mata *et al.*, 2019; FAO, 2020). Ante este contexto, la acuicultura ha cobrado gran importancia en los últimos 40 años, mostrando un crecimiento gradual a nivel mundial. En el caso particular de México la producción pesquera de captura marina para 2018 fue de 1.47 millones de toneladas (FAO, 2020) y se ha reportado un crecimiento de la producción acuícola a una tasa media anual de 15%, superando la tasa media a nivel mundial que corresponde al 6% (SAGARPA, 2017).

Sin embargo, los sistemas acuícolas tradicionales utilizan grandes volúmenes de agua y presentan una rápida acumulación de residuos de alimento y materia orgánica que generan altos niveles de formas tóxicas de nitrógeno, así como producciones irregulares y relativamente bajas por unidad de volumen (Avnimelech, 2007; Collazos and Arias, 2015).

Por lo general, el efluente de las granjas acuícolas es desechado sin tratamiento previo, por lo que contiene muy altos niveles de materia orgánica particulada, sólidos en suspensión, compuestos nitrogenados y metabolitos tóxicos, así como disminución del oxígeno disuelto y la transparencia, provocando contaminación, eutrofización de los cuerpos de agua (sobrecarga de nutrientes, componentes orgánicos e inorgánicos que generan polución, nitrificación y sedimentación de comunidades bentónicas) y la consecuente escasez del valioso recurso (Collazos and Arias, 2015; Jiménez, Collazos and Arias, 2018; Betanzo-Torres *et al.*, 2020). Por otra parte, los frecuentes recambios de agua pueden propagar patógenos que provoquen brotes de enfermedades y fomentar la dispersión de antibióticos o quimioterapéuticos, generando la aparición de genes de resistencia a los antimicrobianos que a largo plazo pueden llevar a la pérdida de cultivos y a bioacumulación de contaminantes nocivos con impacto potencial en la salud pública (Van Doan *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021). Además, algunos individuos del cultivo pueden ser accidentalmente liberados a los cuerpos de agua, introduciendo fauna exótica con el potencial de comprometer a las poblaciones endémicas (Emerenciano *et al.*, 2017), generando así un impacto negativo en las condiciones y procesos ambientales en los ecosistemas (Barraza *et al.*, 2013).

Por su parte, el alimento balanceado proporcionado en las unidades de producción acuícola puede contener micotoxinas que representen un riesgo de intoxicación para los organismos del cultivo. Además, la producción de este alimento ha generado sobreexplotación de peces oceánicos de captura para la obtención de harina y aceite de pescado, utilizadas en la preparación de los piensos balanceados (Emerenciano *et al.*, 2017), (Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022).

Debido a lo anterior, se sugiere que, tanto en México como en el resto del mundo, es necesario buscar el desarrollo de sistemas de producción acuícola sostenibles, capaces de prevenir y minimizar la generación de desechos y que además lleven a cabo el tratamiento y reutilización de efluentes en el sitio de producción para reducir la pérdida de servicios ecosistémicos acuáticos (Barraza *et al.*, 2013). Es importante considerar que para que una unidad productiva sea sostenible debe cumplir de forma satisfactoria y simultánea con lo siguiente: ser suficientemente productiva, económicamente viable y respetuosa con el ambiente, debe ser de alta eficiencia, con altos índices de bioseguridad, rentabilidad e impacto social. (CONACYT, 2017; Betanzo-Torres *et al.*, 2021). Para que lo anterior sea posible, debe considerarse el desarrollo y uso de animales con una genética que les permita la correcta adaptación al sistema, así como la presencia de las condiciones idóneas para la expresión del potencial genético; estas condiciones incluyen la calidad del agua, densidad poblacional, prevención y control de enfermedades, así como el suministro de nutrientes requeridos por los organismos (Guimarães *et al.*, 2021).

En este sentido, la tecnología biofloc ha ganado relevancia, pues es un sistema tanto económica como ambientalmente sostenible para la producción acuícola (de Alvarenga *et al.*, 2018), pues permite el aprovechamiento de la acumulación de residuos de alimento, materia orgánica y compuestos inorgánicos tóxicos a través de microorganismos presentes en el medio acuático (Collazos and Arias, 2015; García, 2017). Las comunidades autótrofas y heterótrofas resuelven los problemas de saturación de nutrientes a partir de su reciclaje como alimento natural para los organismos acuáticos filtradores, logrando reducir significativamente los recambios de agua y los insumos alimenticios, contribuyendo así a la disminución de costos de producción (Avnimelech, 2011; Collazos and Arias, 2015; García, 2017). Esto cobra gran importancia debido a que la digestión de los peces tiene alcances limitados por sus condiciones anatómicas (longitud intestinal reducida), provocando que una fracción de aproximadamente 36% del alimento suministrado a los organismos de cultivo permanezca sin digerir y se excrete como desecho orgánico, dejando el equivalente al 75% de nitrógeno y fósforo de los alimentos en el agua (Crab *et al.*, 2007).

Así pues, resulta imprescindible ahondar en el conocimiento detallado de los diferentes componentes de esta tecnología, así como sus interacciones y el papel que desempeñan al interior del sistema para obtener el mayor rendimiento, pues posee el potencial para convertirse en una fuente de alimentación prioritaria en México y en el mundo, dada su eficiencia y sostenibilidad.

2. Revisión sistemática

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la consulta de artículos científicos y revisiones publicados a partir del año 2000 y hasta la fecha, recabadas en línea en las bases de datos “Scopus”, “CABI, Aquaculture Compendium, Animal Science Data Base y Animal Health and Production Compendium” y “ProQuest, Aquatic Science & Fisheries Abstracts (ASFA) Aquaculture Abstracts” consultadas a través de la plataforma de Biblioteca Digital de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

También se recabó información reciente a través de la página de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), así como de dependencias oficiales en México, tales como secretarías o comisiones gubernamentales.

Adicionalmente, se tomó información de conferencias sobre producción de organismos acuáticos impartidas por especialistas en el área, llevadas a cabo a través del departamento de Educación Continua de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Autónoma de México y de otros organismos veterinarios certificados.

3. Análisis de la información

3.1 Problemas principales a los que se enfrentan la acuicultura y pesca en México

La actividad pesquera consiste en la captura de peces, crustáceos, moluscos y otros organismos de aguas saladas, salobres y dulces (mares, lagos, ríos y lagunas). Por otro lado, la acuicultura se define como el conjunto de actividades encaminadas a la reproducción, crianza y engorde de organismos acuáticos (flora y fauna) y se lleva a cabo en instalaciones como estanques o jaulas localizadas próximas o dentro de cuerpos de agua dulce, salada o salobre (INEGI, 2019; Betanzo-Torres *et al.*, 2020).

Tanto el sector acuícola como el pesquero son fundamentales para la soberanía alimentaria del país, que está orientada a la producción de alimentos de alta calidad, saludables y accesibles para la satisfacción de la demanda nacional y la promoción de una mayor oferta a los mercados internacionales, por lo que se prevé que en los próximos años la producción acuícola y la pesca de captura superen la producción de ganado vacuno, porcino y avícola (SAGARPA, 2017). Desgraciadamente, en las actividades pesqueras a nivel industrial se observa importante sobrepesca de algunas especies de importancia comercial que, al alterar las cadenas tróficas, compromete ampliamente la abundancia y distribución de las comunidades que habitan nuestros mares (Cisneros-Mata *et al.*, 2019).

Pese a que la pesca y acuicultura son sectores productivos alimentarios que en México han tenido un crecimiento constante y el país posee un alto potencial para el desarrollo de estas actividades debido a su diversidad de climas y biodiversidad acuática, existen muchas limitaciones para su máximo aprovechamiento, como la evolución normativa e institucional que ha derivado en múltiples trámites y requisitos para su formalización, obstaculizándolas y provocando que se realicen de manera informal, dando lugar a que las instituciones e instrumentos normativos que lidian con el reto de satisfacer las necesidades de los productores y las comunidades de manera sustentable, fracasen al enfrentarlo (Cuéllar *et al.*, 2018). Además, la información disponible sobre el estado actual de las pesquerías a nivel nacional es muy limitada, dando como resultado una gestión de la pesca ineficaz (Cisneros-

Mata *et al.*, 2019). Esta situación se ve reflejada en un reporte de hallazgos del territorio nacional basado en las actualizaciones 2000-2018 de la Carta Nacional Pesquera en el que se encontró que, de 735 especies capturadas en 83 pesquerías, la mayoría no están evaluadas o las evaluaciones no están disponibles públicamente (Oceana México, 2019). De las poblaciones que tienen un estado declarado en el año 2018, el 14,3% están sobreexplotadas, el 80% están siendo explotadas a su nivel máximo y solo el 5,7% tienen potencial de expansión (Cisneros-Mata *et al.*, 2019; Oceana México, 2019). Se sabe además que el cambio climático ya está teniendo un impacto en los recursos alimentarios marinos, exacerbando los efectos de la sobrepesca, por lo que considerando la relevancia de los alimentos provenientes de la pesca como fuente crítica de proteínas y micronutrientes para satisfacer las necesidades de la creciente población, así como la intensa repercusión de las actividades humanas sobre las poblaciones de organismos acuáticos silvestres que aumenta día con día, resulta evidente la urgencia del desarrollo de políticas sólidas de ordenación pesquera a corto plazo, así como la promoción de la acuicultura y maricultura, pues son las intervenciones que contribuyen mayormente a la reducción de la presión sobre las pesquerías marinas (Cisneros-Mata *et al.*, 2019; CMDRS, 2019).

En el caso del sector acuícola en México, se hace frente a diversos obstáculos para su máximo desarrollo como falta de diversificación y asistencia técnica, elevados costos de insumos y tasas de interés, infraestructura poco desarrollada, contaminación de mares, ríos y esteros, y dependencia de mercados externos para la exportación de productos que satisfagan la demanda nacional. De esta manera, se vuelve más difícil acceder a los ya escasos recursos, principalmente hídricos y de espacio disponibles, por lo que encontrar alternativas altamente rentables y sostenibles se vuelve una prioridad (CMDRS, 2019).

3.2 Acuicultura y tecnología biofloc en México

México ocupa el lugar 24 en producción acuícola a nivel mundial con 397,712 toneladas, siendo la tilapia, el camarón, el ostión, la carpa y la trucha las principales especies cultivadas, de estas el camarón y la tilapia son las más destacables dado su volumen de producción y valor en la industria (CMDRS, 2019). La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es el organismo cultivado más predominante en el territorio nacional, con 4,623 granjas (Betanzo-Torres *et al.*, 2021).

Además del aspecto alimentario y la reducción del impacto ambiental, la acuicultura es una importante fuente de empleos directos en la producción e indirectos en plantas industriales, fábricas de empaque, transportes y restaurantes (CMDRS, 2019). Sin embargo, el uso de tecnologías en el sector acuícola mexicano es muy limitado, pues muchas de las granjas acuícolas que operan en el país son semi-intensivas o extensivas, generalmente con rendimientos bajos, poca o nula experiencia en tecnologías para la producción, transformación y comercialización, baja competitividad, escaso acceso al financiamiento e ineficiente uso de recursos (Lorenzo and Altamirano, 2019; Betanzo-Torres *et al.*, 2021). Los avances tecnológicos en acuicultura se han mantenido dentro del ámbito experimental, dado que se llevan a cabo en condiciones controladas, teniendo poco impacto en el sector comercial, pues muchos productores desconfían de su uso en condiciones reales de producción (Betanzo-Torres *et al.*, 2020).

De esta manera, en lo que concierne a tecnología biofloc en México, no existe una asistencia técnica especializada ni la capacitación requerida para el minucioso manejo de la calidad del agua que la tecnología demanda para su uso exitoso (Betanzo-Torres *et al.*, 2019). Además, la mayoría de los productores desconoce el volumen de agua utilizado en sus unidades acuícolas, así como el costo de producción, por lo que no tienen evidencia de los posibles beneficios que esta tecnología puede ofrecer. Por otra parte, como los aspectos regulatorios en materia de uso de agua en México son flexibles, no ayudan a promover técnicas para el manejo eficiente del agua y sus vertidos. Todo esto, aunado a la baja escala de

producción y los buenos precios minoristas, amplían el riesgo de aumentar el volumen de producción, entorpeciendo la difusión y aplicación de la tecnología biofloc en el país (Betanzo-Torres *et al.*, 2020).

Al tener poco desarrollo en México, la mayoría de las granjas que implementan la tecnología biofloc no tienen más de seis años de experiencia en su uso, aunque muchos de los acuicultores que la utilizan tienen cuando menos 12 años trabajando en el sector acuícola y buscaron este tipo de sistema como una alternativa para elevar su productividad, sin embargo, en muchos sistemas acuícolas con tecnología biofloc no se ha cumplido con las expectativas en este rubro, posiblemente debido a que la tecnología no se está desarrollando de la forma correcta (Betanzo-Torres *et al.*, 2019).

El camarón (*Litopenaeus vannamei*) y la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) son dos de las especies principalmente cultivadas en sistemas convencionales a nivel nacional, mismas en las que la tecnología biofloc ha sido utilizada exitosamente dada la tolerancia de estos organismos a los sólidos suspendidos (García, 2017). Desafortunadamente, se observa una falta de información científica respecto a otras especies susceptibles de ser cultivadas en este sistema en el país (Betanzo-Torres *et al.*, 2020).

Se ha observado que los acuicultores mexicanos utilizan exitosamente la tecnología biofloc principalmente en las fases de crianza y pre-engorde de la tilapia, debido a que en estas se requiere más alimento comercial de costo elevado dado su alto contenido proteico, teniendo un impacto económico muy significativo al reducir considerablemente el volumen de agua y alimento por kilogramo producido (Betanzo-Torres *et al.*, 2019). En otros lugares del mundo, la mayoría de los estudios en tecnología biofloc para producción de tilapia se han centrado en las etapas de pre-engorde y engorde, mientras que los dedicados a la etapa de crianza escasean pese a que en esta etapa las empresas de tilapia suelen operar con altas tasas de recambio de agua para mantener la calidad de esta, dificultando a su vez el control los agentes patógenos (García, Miranda and Coelho, 2019).

Las granjas comerciales con tecnología biofloc se ubican en sitios con características muy diferentes en lo que respecta a clima, temperatura, oscilación térmica, altitud y fotoperiodo (un fotoperiodo de 12 horas es importante para el desarrollo del fitoplancton y su productividad primaria). Esto indica que este tipo de sistema puede implementarse en variadas latitudes de México, con el uso de la infraestructura adecuada (Betanzo-Torres *et al.*, 2019). Por ejemplo, se debe contar con equipos capaces de suministrar mayor cantidad de oxígeno (mejor aireación) en altitudes mayores o invernaderos en lugares con temperaturas bajas o intensamente fluctuantes. En cuanto al tipo de estanques reportados en el territorio nacional, se ha observado que la tecnología biofloc es compatible con los estanques de tipo circular, rectangular, de concreto o cubiertos con geomembrana, entre muchos otros (Betanzo-Torres *et al.*, 2019). Sin embargo, se recomienda que los estanques de tilapia con tecnología biofloc sean pequeños (100-1,000 m²), para evitar la dificultad que representa movilizar grandes volúmenes de agua para la mezcla y aireación del agua, así como redondos o cuadrados con los bordes redondeados y con declive central hacia el drenaje (operado con una tubería y una válvula) para facilitar el desalojo de lodos (Avnimelech, 2011).

En cuanto a la fuente de carbono utilizada, en el territorio nacional predomina el uso de melaza, pues existe una alta disponibilidad de esta en el mercado mexicano y es de bajo costo, además de que es de fácil incorporación a los cultivos (Betanzo-Torres *et al.*, 2019) por su alta solubilidad en agua. Además, se ha identificado que el suministro diario de melaza aumenta la biomasa y disminuye la tasa de conversión alimenticia (Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022).

3.3 Bases que sustentan la tecnología biofloc

Esta tecnología está basada en el principio del reciclaje y reutilización de nutrientes de los residuos producidos por los organismos de cultivo, para transformarlos en biomasa microbiana que pueda ser utilizada *in situ* las 24 horas del día por esos mismos organismos, permitiendo la gestión de la calidad del agua cuyo objetivo principal es el manejo de la concentración de amoníaco (producto metabólico proteico más común de los organismos acuáticos que es soluble) por debajo de niveles tóxicos, evitando los recambios de agua y reduciendo la cantidad de alimento requerido (Choo and Caipang, 2015; Emerenciano *et al.*, 2017), de manera que se disminuya la cantidad de nutrientes descargados que contaminan y alteran la dinámica de los ecosistemas y al ciclo del nitrógeno naturalmente establecido en los cuerpos de agua (Jiménez, Collazos and Arias, 2018).

Para comprender lo que ocurre dentro de los estanques que operan con esta tecnología, es imprescindible recordar que el nitrógeno es un componente de gran importancia en todos los seres vivos y en los sistemas acuáticos, donde se encuentra en diferentes formas, siendo el amoníaco el más relevante para los organismos acuáticos, dado que, en esta forma, su estado soluble, se incorporan y asimilan las moléculas nitrogenadas. Determinadas bacterias heterótrofas, protozoarios y algas pueden tomar el nitrógeno aún en su estado no disuelto, cobrando especial relevancia para esta tecnología (Jiménez, Collazos and Arias, 2018).

Los diferentes compuestos nitrogenados que podemos encontrar en los ambientes acuáticos son nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), nitrógeno molecular (N_2), nitrógeno orgánico disuelto (péptidos, purinas, aminas, aminoácidos) y como nitrógeno orgánico particulado; a la suma de las formas de nitrógeno anteriormente mencionadas se le denomina nitrógeno amoniacal total (NAT) (Collazos and Arias, 2015).

El sistema biofloc requiere una relación carbono orgánico - nitrógeno inorgánico de entre 12:1 y 20:1 en el agua (la relación C:N ideal para los microorganismos fotoautótrofos es 10:1, 15:1 para los quimiolitautótrofos y 20:1 para los heterótrofos), por lo que se requiere el suministro de dietas con bajo contenido de proteína cruda y la adición de fuentes de carbono externo como melaza, salvado de arroz o de trigo, paja compostada, harina de maíz o de trigo, azúcar sin refinar, bagazo de caña de azúcar, glucosa, acetato, glicerol o almidón (Emerenciano *et al.*, 2017; Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; García, Miranda and Coelho, 2019; Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022). Las diversas fuentes de carbono orgánico seleccionadas para agregar al cultivo conducen a diferentes composiciones bacterianas, valores nutricionales, disponibilidades, palatabilidades y digestibilidades en los bioflóculos (Ridha and Saburova, 2020; Shourbela *et al.*, 2021). Carbohidratos simples como el azúcar y la melaza son rápidamente degradadas por las bacterias, por lo que deben ser agregadas muy frecuentemente para que la actividad de las bacterias heterótrofas se mantenga en el nivel óptimo. Por otro lado, los carbohidratos complejos como el almidón o la celulosa son lentamente descompuestos por las bacterias y conducen a niveles de carbohidratos más estables, así como a tiempos de respuesta más lentos por parte de las comunidades bacterianas (Hargreaves, 2013; Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022). De esta manera, para la selección de la fuente de carbono a utilizar en cada producción acuícola debe considerarse la disponibilidad y rentabilidad del insumo en el área, la eficiencia de absorción por parte de las bacterias, la solubilidad en el agua (debe ser soluble en agua o pulverizada) y la biodegradabilidad (Hargreaves, 2013; Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022). El azúcar y la harina de trigo son dos de las fuentes de carbono más comúnmente utilizadas en la producción de tilapia bajo esta tecnología (Ridha and Saburova, 2020).

Debe haber poco o nulo recambio de agua y alta oxigenación, que permitan el crecimiento de las comunidades microbianas, especialmente de bacterias heterótrofas que metabolizan los carbohidratos y aprovechan los desechos inorgánicos nitrogenados, reduciendo sus niveles, mejorando la calidad del agua y transformando a su vez la materia orgánica en biomasa bacteriana (nuevas células)

que funge como fuente de alimento natural que aporta principalmente proteína, ácidos grasos, vitaminas y minerales a la dieta de las especies cultivadas debido a una compleja interacción dinámica entre la materia orgánica, el sustrato físico y una amplia gama de microorganismos (Emerenciano *et al.*, 2017; García, Miranda and Coelho, 2019). Estos microorganismos (algas, hongos, bacterias, protozoarios, zooplancton, nemátodos), así como los restos de organismos muertos, heces y alimentos no consumidos, coloides, polímeros orgánicos y cationes se organizan en macro agregados asociados a una matriz orgánica o partícula conocida como agente nucleante y están unidos por moco (el exopolisacárido poli- β -hidroxibutirato o PHB) secretado por las bacterias heterótrofas, mediante la acción de microorganismos filamentosos o por interacciones electrostáticas (Hargreaves, 2013; Monroy *et al.*, 2013; Ridha and Saburova, 2020; Pérez, 2021). Estos complejos que son conocidos como bioflóculos (la mayoría son microscópicos, pero los más grandes se pueden observar a simple vista) sirven de alimento natural, llevan a cabo el tratamiento de desechos, mejoran la calidad del agua, y previenen enfermedades, gracias a que no hay constante entrada de agua al sistema y a la competencia entre los microorganismos benéficos y patógenos, además de que contribuyen al fortalecimiento del sistema inmune de los organismos en cultivo (Crab *et al.*, 2007; Addo *et al.*, 2021; Shourbela *et al.*, 2021). La formación y suspensión de estos agregados en la columna de agua del sistema de cultivo es resultado de la acumulación de nutrientes y de la aireación aplicada (Xu *et al.*, 2021).

Al mantenerse la calidad del agua, disminuye el volumen utilizado para la producción, y se aumenta a la vez la viabilidad del cultivo mediante la reducción del índice de conversión alimenticia, esto significa que la cantidad de alimento balanceado que debe suministrarse a los peces disminuye drásticamente y con ello el costo de la producción (los costos de alimentación pueden reducirse más del 25%) y el impacto ambiental (Venegas, 2019; Betanzo-Torres *et al.*, 2020). Además, la tecnología biofloc posibilita una alta producción en un área pequeña, haciéndola mucho más eficiente que los cultivos convencionales (Emerenciano *et al.*, 2017).

La importancia del mantenimiento de la calidad del agua a través del reciclaje de los compuestos nitrogenados presentes en forma de desechos en el sistema, radica en los efectos desfavorables que estos pueden tener sobre la salud de los organismos cultivados (Jiménez, Collazos and Arias, 2018). En este sentido, el amoníaco y el nitrito resaltan por su toxicidad para los peces, convirtiéndose en un factor limitante para el crecimiento y supervivencia de estos en cultivo, de manera que remover estos compuestos o transformarlos en otros no tóxicos es esencial si se pretende aumentar la biomasa del sistema y disminuir los riesgos (Collazos and Arias, 2015). Se sabe que la variable biológica con impacto significativo en la cantidad de amoníaco secretada es el peso corporal, pues a mayor peso corporal, menor es la tasa de excreción del compuesto (Jiménez, Collazos and Arias, 2018). En producciones de tilapia se ha observado que la mortalidad en adultos comienza a concentraciones de amoníaco de 2 mg/L y cuando el nitrito supera los 5 mg/L; así mismo, para los alevines las concentraciones de 1 mg/L de amoníaco y 7 mg/L de nitrito durante 96 horas resultan letales (Jiménez, Collazos and Arias, 2018). Es importante considerar que solo aproximadamente el 20-30% del nitrógeno presente en el alimento es asimilado por los peces, mientras que el 70-80% restante es liberado al medio acuático en forma de desecho (Collazos and Arias, 2015). Con la tecnología biofloc una parte de este nitrógeno residual es reincorporado a la cadena trófica mediante las células bacterianas que metabolizan ciertos compuestos nitrogenados como el amoníaco y los nitratos (Collazos and Arias, 2015; Jiménez, Collazos and Arias, 2018). Así, al ser consumidas como proteína microbiana, contribuirán con el crecimiento de los organismos del cultivo (Hargreaves, 2013).

Se sugiere que, por cada unidad de crecimiento de los organismos asociada al alimento suministrado, se derivan entre 0.25 y 0.5 unidades de crecimiento correspondientes a la proteína microbiana, es decir que entre el 20 y 30% del crecimiento de los organismos se debe al consumo y digestión de esa proteína microbiana presente en los bioflóculos. Lo anterior explica la mejora de la conversión alimenticia del sistema biofloc en comparación con los sistemas convencionales, siendo un excelente predictor de la rentabilidad del sistema y la sostenibilidad de la empresa (Hargreaves, 2013).

El amoníaco es el producto nitrogenado más excretado por los organismos acuáticos (70-95% del total). Es producido principalmente en el hígado, músculo esquelético, riñones y branquias de los peces, por donde finalmente es eliminado. Una vez dentro del agua la forma que tomará (ionizada o amonio; no ionizada y tóxica o amoníaco) depende del pH y la salinidad presentes en el medio acuático, adquiriendo proporciones mayores de la forma no ionizada a pH alcalino y menores de esta misma en pH ácido. Cuando hay un exceso de amoníaco en el sistema, el metabolismo de los peces disminuye y se generan lesiones en branquias, sangre y otros tejidos debido a la disminución en la capacidad de transporte de oxígeno por parte de la hemoglobina, provocando agotamiento de la energía por hiperactividad e hiperventilación y dando lugar a un aumento en la absorción de agua que resulta en la muerte del individuo. La variable biológica con impacto principal sobre la cantidad de amoníaco excretada es el peso corporal, pues cuanto mayor es el mismo, menor es la tasa de excreción (Jiménez, Collazos and Arias, 2018).

Por otro lado, la toxicidad del nitrito depende del pH (mayor en pH ácido) y de la concentración de cloro (a mayor concentración disminuye la toxicidad). Los efectos generados en los peces por este producto nitrogenado son: desequilibrio iónico (compite con la entrada de Cl^- , activa la salida de K^+ , e impide la absorción de Na^+), oxidación del hierro de la hemoglobina que resulta en metahemoglobina (no es capaz de transportar oxígeno), aumento de frecuencia cardíaca, inhibición de síntesis de hormona T4, provocando retención renal de agua y alterando la excreción de amoníaco y urea (Jiménez, Collazos and Arias, 2018).

En el caso del nitrato, se tiene conocimiento de que una vez absorbido por los peces se transforma en nitrito, provocando su toxicidad, sin embargo, los organismos son altamente tolerantes a este compuesto (Jiménez, Collazos and Arias, 2018).

La tecnología biofloc ha demostrado alta eficiencia, sostenibilidad, bioseguridad y conveniencia por el menor uso de alimento balanceado y agua, así como beneficios en la productividad y de crecimiento en diversas especies de acuicultura. Sin embargo, su administración no es sencilla y se requiere cierta sofisticación técnica

para la funcionalidad y productividad del cultivo (Emerenciano *et al.*, 2013; Hargreaves, 2013).

Oreochromis niloticus y *Litopenaeus vannamei* son las especies más utilizadas en este tipo de producción, pues la adaptación de los organismos de cultivo a los sistemas con tecnología biofloc está asociada a la tolerancia de estos a altas concentraciones de sólidos, compuestos nitrogenados y densidades poblacionales. Los organismos con la adaptabilidad a la tecnología biofloc poseen factores morfológicos que permiten la captura de los agregados microbianos, así como la ingestión y digestión de los detritos y partículas microbianas (Emerenciano *et al.*, 2013). Los bioflóculos son una excelente fuente de nutrientes para los peces cultivados y el nivel de ingesta de estos, depende de los hábitos de alimentación de cada especie, de manera que la tilapia del Nilo, con hábitos alimenticios omnívoros, puede aprovechar eficientemente los nutrientes que la tecnología biofloc ofrece (Shourbela *et al.*, 2021).

De entre las diferentes especies de *Oreochromis*, la tilapia del Nilo es la especie de elección para ser cultivada debido a su particular resistencia a las altas densidades poblacionales, a su adaptación a las condiciones climáticas de diversas ubicaciones geográficas y su comerciabilidad, pues tiene un agradable sabor y apariencia, sin espinas musculares y con bajo contenido de grasa. Su rendimiento se ve afectado principalmente por la composición de la dieta (la proteína, lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales deben estar en las cantidades óptimas), la densidad poblacional, tasa y frecuencia de alimentación, así como la calidad del agua (Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022).

Los cultivos con tecnología biofloc se desarrollan a través de dos fases: la fase de maduración o "puesta en marcha" y la fase de cultivo. Durante la fase de maduración y las primeras semanas de la fase de cultivo se utiliza un biofloc de aguas verdes con una densa floración de microalgas (fotoautotrófico), quienes desempeñan el papel principal para el control del amoníaco (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017). Durante esta fase se puede observar un ligero exceso de oxígeno en el agua y se observan concentraciones altas de amoníaco y posteriormente de nitrito, en

concordancia con el desarrollo de las comunidades bacterianas, de manera que se sugiere adicionar un carbohidrato simple como el azúcar para promover una rápida respuesta por parte de estas bacterias heterótrofas, pues al superarse la capacidad de asimilación de carbono por parte de las algas, son las bacterias quienes aprovechan este sustrato (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017). A lo largo de la fase de maduración, la tasa de alimentación diaria aumenta gradualmente de 100 a 200 kg / ha, pero debe tenerse precaución de que esta no aumente demasiado rápido para evitar que las concentraciones de productos nitrogenados alcancen niveles tóxicos, perjudicando el crecimiento de los organismos de cultivo, la tasa de conversión alimenticia, la inmunidad o incluso llegar a ser letales. Al inicio de la puesta en marcha pueden utilizarse microorganismos previamente cultivados (de forma independiente) para luego agregarse a los estanques antes de la siembra de los peces (Hargreaves, 2013). Las condiciones que conducen a la transición de un biofloc de aguas verdes (fotoautotrófico, predominancia de algas) a uno de aguas marrones (heterotrófico, predominancia de bacterias) se modifican de acuerdo con el tipo de sistema (estanques, conductos de agua, tanques) (Hargreaves, 2013). Es importante considerar que a veces es difícil percibir visualmente la transición. El cambio funcional de un excedente a un déficit de oxígeno ocurre mientras el agua sigue luciendo verde. El cambio de color de verde a marrón tiene lugar después de que ha ocurrido la transición de un sistema de biofloc mayoritariamente algas a uno mayoritariamente bacteriano. Por lo tanto, el color del agua no es un indicador preciso del estado del sistema. A altas tasas de aireación, la aparición de grandes cantidades de espuma en la superficie es una buena señal de un sistema en transición (Hargreaves, 2013). Cuando la tasa de alimentación diaria asciende a 300 kg / ha hay un cambio abrupto pues la alta densidad de algas disminuye la cantidad de luz que penetra en el agua, dificultando la fotosíntesis. A continuación, las bacterias comienzan a crecer a gran velocidad y se desarrollan los flóculos, cuya presencia se ve reflejada en el aumento en la concentración de sólidos en suspensión (250 a 500 mg/L), así como en el nivel de oxígeno disuelto. Cuando la tasa de alimentación se encuentra entre 400 y 600 kg / ha por día, el agua se torna de color marrón verdoso. El sistema se considera "maduro" en aproximadamente

30 a 50 días cuando los sólidos suspendidos han aumentado y, después de alcanzarse los picos de nitrógeno amoniacal total y nitrito, estos compuestos finalmente descienden y se estabilizan (Emerenciano *et al.*, 2017).

Cuando la tasa de alimentación asciende a más de 700 kg / ha por día, el agua aparece marrón debido a la presencia de los bioflóculos y esencialmente no hay contribución de algas. De esta forma, la generación de biomasa microbiana y material orgánico aumenta la concentración de flóculos a lo largo de las fases (Emerenciano *et al.*, 2017; Gallardo-Collí and Pérez-Rostro, 2019). Se sugiere el mantenimiento de la vía heterotrófica como dominante para el control del amoníaco, ya que se considera la más confiable y eficiente. Para conseguirlo se debe añadir al sistema 0.5-1 kg de una fuente de carbohidratos por cada kg de alimento con 30-38% de proteína (Hargreaves, 2013). Sin embargo, existen varios inconvenientes en la continua adición de carbono orgánico, pues se generan altos niveles de sólidos bacterianos que al acumularse de forma descontrolada pueden ocluir las branquias de los peces, generando mayor necesidad de aireación para el mantenimiento de los sólidos en suspensión y para la demanda respiratoria, reduciendo considerablemente el tiempo de respuesta en caso de presentarse alguna falla en la electricidad, además de que esto supone un aumento de la demanda de energía y disposición de un sistema para la eliminación y tratamiento de los sólidos acumulados (Hargreaves, 2013). Entonces, si no se cuenta con un sistema de aireación confiable o no hay un respaldo en caso de fallas, se puede reducir la adición de carbono permitiendo que la concentración de flóculos que los organismos de cultivo toleran no se exceda para no ponerlos en riesgo (Emerenciano *et al.*, 2017). No se debe olvidar que una vez instaurada una vía, hay que llevar a cabo una transición gradual si se decide cambiar a otra, para permitir el desarrollo de los microorganismos que dominarán el sistema, evitando que los metabolitos tóxicos se acumulen. También hay que tener presente que se requiere un aumento en la potencia de aireación conforme aumenta la tasa de alimentación y el desarrollo de flóculos (Hargreaves, 2013).

3.4 Mantenimiento de la calidad del agua en el sistema biofloc

Como se ha mencionado, en los sistemas de producción acuícola con tecnología biofloc, la acción de diferentes microorganismos se encarga del mantenimiento de la calidad del agua, por lo que es importante que las variables fisicoquímicas se mantengan bajo un escrutinio estricto que permita corregir las alteraciones lo más rápido posible cuando estas se presenten.

Guimarães y colaboradores (2021), reportan que el mantenimiento de la salinidad entre 1.5 y 2.0 g/L permite reducir la toxicidad del nitrito en caso de presentarse picos de este, actuando como amortiguador. Se sabe que, al aumentar la densidad poblacional al interior del sistema, aumenta también la salinidad, lo cual es atribuible a la cantidad de residuos de sales presentes en el alimento balanceado que no se consume y termina por disolverse en el agua. Los iones de cloruro también tienen el potencial de reducir la toxicidad del nitrito, pues inhiben su absorción a través de las branquias (Guimarães *et al.*, 2021).

Las transformaciones y la dinámica del amoníaco en los sistemas biofloc son complejas e implican la interacción entre algas y bacterias que compiten por él. La importancia relativa de cada proceso depende de muchos factores, como la tasa de alimentación diaria, la concentración de sólidos en suspensión (bioflóculos), la concentración de amoníaco, la intensidad de la luz y la proporción de entrada de carbono y nitrógeno (C:N) (Hargreaves, 2013), que a su vez dependen en gran medida de la densidad de población dentro del sistema de cultivo (Guimarães *et al.*, 2021). Esto tiene un impacto en las variables fisicoquímicas del agua, principalmente en el pH y el oxígeno disuelto, que a mayor densidad poblacional se observan disminuidos; mientras que el nitrato, la salinidad, los sólidos suspendidos y el amoníaco presentan un patrón opuesto. Por otra parte, al análisis bromatológico, el contenido de cenizas del biofloc se reduce y el de energía bruta aumenta en las densidades poblacionales más altas (Guimarães *et al.*, 2021).

En los sistemas con tecnología biofloc, la concentración de amoníaco es controlada mediante tres vías dependiendo del microorganismo que lidere el proceso: absorción por algas (eliminación fotoautótrofa), asimilación bacteriana (conversión

de amoníaco a biomasa microbiana de manera directa por bacterias heterótrofas) y nitrificación (bacterias autótrofas que metabolizan el amoníaco a nitrato), cuya importancia relativa depende de factores como la relación C:N de ingreso, la concentración total de amoníaco, la velocidad de suministro de alimento diario, la intensidad de la luz y el volumen de flóculos (Crab *et al.*, 2007; Hargreaves, 2013; Choo and Caipang, 2015).

La vía de nitrificación está influenciada por el nivel de nitrógeno inorgánico disponible en el sistema, la biomasa bacteriana, el oxígeno y el pH, de manera que la calidad del agua adquiere un papel fundamental para que se lleve a cabo correctamente (Martins *et al.*, 2019). En particular, el pH posee influencia directa sobre el funcionamiento del proceso dado que, aunque no tiene efectos significativos durante la primera fase, a lo largo de la segunda fase está relacionado con la velocidad de nitrificación. Por debajo de pH 7.0, el ciclo del nitrógeno puede verse comprometido, dado que se genera mayor consumo de alcalinidad y reducción del pH en el sistema, por lo que se requiere utilizar compuestos alcalinizantes (Martins *et al.*, 2019). Se ha reportado que a pH de 6.5 el oxígeno disuelto en el agua alcanza concentraciones máximas y se produce menor cantidad de sólidos totales, en comparación con niveles más altos (7.5-8.3), ofreciendo la ventaja de disminuir la cantidad de lodos producidos y la frecuencia de clarificaciones que deben realizarse al agua a lo largo del ciclo productivo. Además de lo anterior, las oscilaciones de pH también pueden representar desafíos fisiológicos para los peces, pues están relacionadas con la alteración del equilibrio ácido-base, aumento de la permeabilidad branquial con sus consecuentes pérdidas iónicas y absorción de agua, además de alterar la excreción de amoníaco y el estrés oxidativo (Martins *et al.*, 2019).

Para el mantenimiento de los microorganismos y de los peces cultivados en sistemas con tecnología biofloc, la mezcla intensiva del agua es fundamental, dado que el funcionamiento del sistema depende de la suspensión de los sólidos en la columna de agua; de otra manera los flóculos podrían fragmentarse y dirigirse hacia el fondo del estanque, formando pilas que consumen rápidamente el oxígeno y

crean áreas anaeróbicas que liberan sulfuro de hidrógeno, metano y amoníaco (compuestos altamente tóxicos) (Avnimelech, 2011; Hargreaves, 2013). Por otra parte, se requiere que el suministro de oxígeno sea suficiente para satisfacer la demanda, que en estos sistemas de producción acuícola es bastante alta, dado el requerimiento respiratorio de los peces de cultivo y de la comunidad microbiana que metaboliza los residuos orgánicos. Este consumo de oxígeno (organismos de cultivo y microorganismos) ha sido estimado en cuando menos 4mg O₂/L al día, aunque deben considerarse las condiciones de cada estanque para ajustar esta cifra de forma exacta (Collazos and Arias, 2015; Venegas, 2019). De esta manera, el rango de aireación sugerido para los estanques de *Oreochromis niloticus* es de 10 a 20 HP por cada 1,000 m² (Avnimelech, 2011). El aireador debe ser ajustado de acuerdo con el tamaño de los peces y la biomasa dentro del estanque, recordando que los fallos en el sistema de aireación pueden tener consecuencias fatales si no existe un respaldo que se active en menos de una hora (Avnimelech, 2011). Otro importante aspecto a considerar es que la excesiva turbulencia generada por la aireación puede tener un impacto negativo en los organismos cultivados al dificultarles la ubicación del alimento, por lo que la distribución de los aireadores y el tipo de equipo utilizado cobran gran relevancia (Hargreaves, 2013). Se requiere que se genere un movimiento circular del agua, de manera que las partículas de sedimento se asienten lo más cerca posible del drenaje. Como también se pretende mantener a los flóculos suspendidos en el agua, se aconseja la colocación de un aireador de tipo aspirador o elevadores de aire. Si estos aireadores se colocan en el sitio propicio, los bioflóculos menos densos serán resuspendidos, mientras que los más densos se sedimentarán para su posterior drenaje (Avnimelech, 2011). Los residuos de flóculos que se sedimentan pueden eliminarse del cultivo mediante el bombeo de lodos desde el centro del estanque o volver a suspenderse con el reposicionamiento de los aireadores (Hargreaves, 2013). Como otra alternativa de control de la acumulación de sólidos, puede agregarse la fuente externa de carbono orgánico solo cuando las concentraciones de nitrógeno amoniacal total superen cierto rango preestablecido, como el de ≥ 1 mg/L de NAT que sugiere (Guimarães

et al., 2021), que ofrece el beneficio adicional de reducir los costos de la fuente de carbono.

La forma en que los sistemas con tecnología biofloc se manejan favorece la presencia de una gran cantidad de iones, debido a la corrección de la alcalinidad, la reposición del agua que se pierde por evaporación y durante el proceso de clarificación. En el caso del uso de bicarbonato (NaHCO_3) para regular la alcalinidad, se produce acumulación de Na^+ (Martins *et al.*, 2019). Tanto el ion sodio como el ion calcio juegan un papel fundamental en la formación de la estructura del flóculo, aunque aún falta conocer su dinámica dentro del sistema con mayor profundidad. Se sugiere que el Ca_2^+ se adhiere a los bioflóculos para neutralizar las cargas negativas de las sustancias poliméricas extracelulares favoreciendo a su vez la adhesión de microorganismos (Martins *et al.*, 2019).

Se sabe que en sistemas con tecnología biofloc, el ciclo de PO_4 se lleva a cabo a cargo de microorganismos como bacterias heterótrofas. El monitoreo de los niveles de este compuesto es muy importante en sistemas acuícolas, debido a su función como indicadores de reutilización de agua y de descarga como efluente (Martins *et al.*, 2019).

3.5 Tipos de biofloc

Los sistemas de biofloc pueden clasificarse de diferentes maneras, pero una de las más destacables los divide en los expuestos y no expuestos a luz natural (**Cuadro 1**). En el primer caso se habla de estanques revestidos al aire libre o canales dentro de invernaderos, donde el agua es verde y las interacciones entre los microorganismos están dominados por algas y algunas bacterias; mientras que en el segundo caso se hace referencia a sistemas de agua marrón en donde los procesos bacterianos dominan el control de la calidad del agua (Hargreaves, 2013). En los estanques de aguas verdes, expuestos a luz natural, se desarrolla una densa floración de algas debida a la absorción y almacenamiento de nutrientes provenientes de la materia orgánica en descomposición, como materia fecal, organismos muertos o alimento no consumido que las algas llevan a cabo. La velocidad de absorción de amoníaco por esta vía depende de la cantidad de luz que penetra en el agua, por lo que en días nublados o si los flóculos son demasiado densos, pueden presentarse picos de amoníaco. Además, en este tipo de sistemas también suelen existir fluctuaciones en la concentración de oxígeno disuelto y de pH (Hargreaves, 2013; Choo and Caipang, 2015).

Los estanques de aguas marrones, por otra parte, no están expuestos a la luz natural y son dominados por las bacterias heterotróficas. Funcionan al suplementar al sistema con una fuente de carbono orgánico externa, generando una demanda de nitrógeno que se satisface con el aprovechamiento del amoníaco presente. En los sistemas con bajo intercambio de agua, los productos nitrogenados tienen un reciclaje continuo entre el amoníaco disuelto y las bacterias o algas (Choo and Caipang, 2015). En sistemas con biomásas menores a 0.5 kg/m^3 , los procesos dominantes tienden a ser los llevados a cabo por algas. A relaciones C:N bajas, se favorece la oxidación del amoníaco a nitrato por parte de bacterias de lento crecimiento (quimiolitioautótrofas), cuyo establecimiento en estanques con tecnología biofloc puede acelerarse mediante la aplicación de agua rica en flóculos maduros provenientes de ciclos de cultivo anteriores en los que esta comunidad nitrificante ya se ha desarrollado. Al aumentar la relación C:N suplementando con

una fuente de carbono orgánico, se estimula la asimilación de amoníaco por parte de las bacterias heterótrofas que crecen más rápido y que generan 40 veces más biomasa por unidad de sustrato en comparación con las quimiolitioautótrofas, además de que asimilan mayor cantidad de amoníaco, oxidándolo a nitrato (Ebeling, Timmons and Bisogni, 2006; Martins *et al.*, 2020). De esta forma, en los sistemas con tecnología biofloc suplementados con carbono orgánico, la concentración de sólidos suspendidos totales aumenta a mayor velocidad. Sin embargo, una mayor proporción del nitrógeno excretado puede estar disponible como biomasa microbiana en los flóculos, expresada como “sólidos suspendidos volátiles”, en comparación con los sistemas que dependen más de la nitrificación, por lo que los peces en el cultivo pueden beneficiarse al cosechar los flóculos (Avnimelech, 2007; Martins *et al.*, 2020)

3.6 Desempeño productivo de *Oreochromis* spp. bajo sistema biofloc

Tanto *Oreochromis niloticus* como otras especies de tilapia han sido cultivadas bajo sistemas con tecnología biofloc alrededor del mundo, reportándose diferentes resultados de acuerdo con las condiciones del cultivo.

En 2007, Avnimelech realizó un estudio con *Oreochromis mossambicus* en el que identificó que el sistema biofloc ofrece la posibilidad de disminuir las raciones de alimento hasta en un 20%, mejorando a la vez el crecimiento diario específico promedio en 1.39% respecto a los cultivos convencionales (**Cuadro 2**). Además, observó que los peces consumen el alimento más lentamente en los estanques con tecnología biofloc: en el estanque control los peces se abalanzan sobre el alimento y los gránulos flotantes desaparecen en 10 minutos, mientras que en los estanques de biofloc los peces mordisquean lentamente su alimento hasta terminar la ración en aproximadamente 30 minutos. Lo anterior se asocia a que los peces tienen un suministro continuo de alimento con los bioflóculos disponibles y no experimentan periodos de ayuno.

En 2016, Day y colaboradores hicieron un estudio comparativo del rendimiento de diferentes especies de tilapia: *Oreochromis mossambicus* (tilapia de Mozambique), *Oreochromis andersonii* (tilapia de tres puntos) y *Oreochromis niloticus* (tilapia del Nilo) bajo un sistema de cultivo con tecnología biofloc; cuyos resultados mostraron que la mejor ganancia diaria de peso y conversión alimenticia corresponde a *O. niloticus*, seguida de *O. mossambicus*. Así mismo, la menor mortalidad fue registrada para *O. niloticus* y la más alta para *O. mossambicus* (Day, Salie and Stander, 2016). De este estudio, se desprende la conclusión de que *O. niloticus* es la especie que muestra superioridad en adaptación y desempeño productivo respecto a otras especies de tilapia (**Cuadro 2**).

García-Ríos y colaboradores hicieron un estudio con crías de *Oreochromis niloticus* en 2019, utilizando diferentes fuentes de carbono externo: harina de maíz, harina de trigo y azúcar (**Cuadro 3**), identificando a esta última como la fuente que ofrece el mayor beneficio en peso final y eficiencia proteica de los organismos cultivados, mientras que la harina de trigo fue la que presentó el menor beneficio de los tres. Al considerar el costo del alimento, se observó que el costo de producción por lote con tecnología biofloc asciende a 5.18 – 6.53 USD, mientras que el cultivado de forma convencional alcanza los 9.13 USD por lote, demostrando la eficiencia productiva de la especie cultivada bajo un sistema con esta tecnología (**Cuadro 2**).

En 2019, Mirzakhani y su equipo de trabajo utilizaron 5 diferentes fuentes de carbono: melaza de remolacha azucarera y harina de trigo en diferentes combinaciones (100% de cada una, 75%-25% de cada una y 50% de cada una), así como dos proporciones C:N diferentes (15:1 y 20:1) (**Cuadro 3**). Los resultados mostraron mejorías en el crecimiento, en la longitud y diámetro de las vellosidades intestinales, en la respuesta inmunitaria humoral, así como en la calidad del agua (**Cuadro 4**) en los estanques con tecnología biofloc respecto a los cultivos convencionales, siendo la relación C:N de 15:1 y el 100% de harina de trigo como fuente de carbono externo la que mostró resultados superiores. Se observó que la interacción entre la relación C:N y la composición de la fuente de carbono tuvo gran influencia sobre la mejora de los parámetros, dando cuenta de que el efecto de cada

variable depende de la otra. También se identificó que la harina de trigo puede proporcionar cantidades importantes de otros nutrientes con el potencial de mejorar la composición bioquímica como proteínas, vitaminas (particularmente B), fitoquímicos (fructanos, betaína, colina, ácidos fenólicos y derivados de esteroides) y fibra. Además de que las partículas dispersas de harina de trigo pueden fungir como un excelente sustrato para el desarrollo y crecimiento de microorganismos, aumentando así el valor nutricional de los flóculos y teniendo un impacto positivo en el crecimiento y la respuesta inmunitaria de los organismos de cultivo (Mirzakhani *et al.*, 2019) (**Cuadro 2**).

Asimismo, Ridha y colaboradores (2020) evaluaron el efecto de tres diferentes fuentes de carbohidratos sobre la calidad y consumo de agua, la carga bacteriana al interior del sistema, el crecimiento de los peces y la calidad de carne en cultivos de *Oreochromis niloticus* bajo sistema biofloc. Las fuentes de carbono seleccionadas para el estudio fueron azúcar, harina de trigo y harina de malta (**Cuadro 3**), siendo el azúcar el que generó mayor volumen de flóculos. Se observó que la harina de trigo fue la mejor fuente de carbono para estimular que las poblaciones bacterianas se establecieran en el intestino, así como la que dio lugar a las concentraciones más altas de proteína y ácidos grasos en los flóculos, mientras que fue la de malta la que provocó un aumento en la cantidad de lípidos. En cuanto a la calidad de carne, se identificó que el contenido de proteína y lípidos fue más alto en el tratamiento con harina de malta, mientras que la harina de trigo propició la más alta proporción de ácidos grasos omega 3 y 6. Respecto al crecimiento de los peces, la harina de malta fue determinada como la mejor (**Cuadro 2**). Se concluyó además que el sistema biofloc genera un importante ahorro de agua con una descarga mínima de contaminantes en relación con los cultivos convencionales.

Eventualmente, en 2021, Shourbela y su equipo estudiaron el impacto de la densidad de siembra (**Cuadro 5**) y las fuentes de carbono sobre tilapias del Nilo cultivadas bajo sistema biofloc. Se emplearon densidades poblacionales altas (280 peces/m³) y bajas (140 peces/m³) y como fuentes de carbono glicerol, melaza y

almidón (**Cuadro 3**). Reportaron que la respuesta inmune y la salud general mejoran con el uso de la tecnología biofloc sin importar la densidad de siembra. Asimismo, identificaron a la melaza como la fuente de carbono que promueve en mayor medida el desempeño productivo y la salud de las tilapias en cultivo (**Cuadro 2**).

Por otra parte, en 2022, Sarsangui y colaboradores también evaluaron el efecto de la densidad poblacional (**Cuadro 5**), en este caso en conjunto con diferentes niveles de restricción de alimento, sobre la calidad del agua el rendimiento productivo y la inmunidad en *Oreochromis niloticus*, reportando que la tecnología biofloc mejoró considerablemente los índices de crecimiento como la con de peso y la conversión alimenticia, la composición corporal, así como los parámetros del agua (especialmente los productos nitrogenados) (**Cuadro 3**) y la función inmunológica (inmunoglobulina total, actividad de lisozima y catalasa) respecto al sistema convencional. Se observó que con la tecnología biofloc puede reducirse en 15% la tasa de alimentación y se concluyó que la densidad de siembra sugerida en larvicultura de tilapia en este sistema es de 1,000 peces / m³, permitiendo eficientizar el uso del agua, el equipo y el espacio (**Cuadro 1**).

Para 2023, Elnady y su equipo llevaron a cabo la fase de engorda de tilapias del Nilo bajo tecnología biofloc, alimentando a los organismos a razón de 1.2%, 1.4%, 1.6% y 2% de biomasa (**Cuadro 6**), determinando que a tasa de alimentación de 1.4% y 1.6% se observa mejora del índice de conversión alimenticia en comparación con el control (2.0%). Sin embargo, se señala a la tasa de alimentación al 1.4% de biomasa como la óptima, ya que, sin comprometer la ganancia diaria de peso, disminuye el costo de alimentación y aumenta la rentabilidad del cultivo (**Cuadro 2**).

También en 2023, Cavatti y su equipo, evaluaron el desempeño de poblaciones de tilapia del Nilo de dos generaciones distintas, generación base y generación 5, obtenidas de un programa de mejoramiento genético de selección para peso corporal en sistema biofloc, utilizando además dos diferentes densidades poblacionales (**Cuadro 5**). Como resultado del estudio, determinaron que se observa una ganancia diaria de peso considerablemente mejor en la generación 5 en comparación con la 0, disminuyendo 57 días el tiempo a la matanza (750 g) y

reduciendo en 0.22 unidades el índice de conversión alimenticia (**Cuadro 2**), disminuyendo con ello el costo operativo total y aumentando a su vez la utilidad, esto solo en la densidad poblacional baja (12.5 individuos/m³).

En 2019, Martins y colaboradores evaluaron los efectos del pH sobre la supervivencia, el crecimiento, la calidad del agua y la composición proximal de los flóculos, así como en el estrés oxidativo en tilapias del Nilo, reportando que la oxidación del nitrito a pH de 6.5 ocurre más lentamente en comparación con pH 7.5 y 8.3. Por otra parte, el peso final más alto se identificó en el tratamiento con pH 7.5, mientras que la supervivencia, la tasa de crecimiento diaria y la tasa de conversión alimenticia, así como los parámetros fisiológicos y bioquímicos que indican la salud de los peces, no fueron afectados por el nivel del pH (**Cuadro 2**). De lo anterior se concluyó que *Oreochromis niloticus* puede ser cultivada en pH de 6.5 a 7.5 para promover el más alto desempeño en crecimiento, rendimiento neto y eficiencia productiva.

Respecto al uso de tilapia roja *Oreochromis* sp., Widanarni, Ekasari y Maryam realizaron en 2012 un estudio con diferentes densidades poblacionales (25, 50 y 100 peces/m³), con el propósito de evaluar el desempeño productivo y la calidad del agua en un sistema con tecnología biofloc donde la fuente de carbono externa fue melaza y la proporción de C:N de 15:1. Se demostró que la tecnología biofloc puede prevenir las fluctuaciones en los parámetros de calidad de agua y que la cantidad de alimento suministrado se reduce significativamente respecto a los sistemas de producción convencionales. La mayor supervivencia se reportó a densidad de 25 peces/m³ (97%) con tecnología biofloc (Widanarni, Ekasari and Maryam, 2012) (**Cuadro 2**).

En 2020, Putra y colaboradores también evaluaron el crecimiento de la tilapia roja *Oreochromis* sp. cultivada en estanques con tecnología biofloc, empleando melaza como fuente de carbono (**Cuadro 3**) y aplicando diferentes cantidades de esta (50, 100, 150 y 200 ml/m³). Los resultados mostraron diferencias significativas en el peso final y crecimiento específico al añadir 200 ml/m³ a los estanques, pero no se observaron diferencias en la supervivencia (Putra *et al.*, 2020) (**Cuadro 2**).

Por otra parte, Bañuelos y colaboradores, trabajaron en 2021 probando el desempeño de la tilapia roja (*Oreochromis* sp.), a diferentes densidades poblacionales en agua de mar adicionada con probióticos (**Cuadro 1**), cuyos resultados mostraron que el estrés generado por encontrarse en estanques con agua de mar y alta densidad poblacional provoca una disminución en la tasa de crecimiento y aumento de peso; sin embargo, la respuesta antioxidante e inmunológica de la tilapia roja cultivada a alta densidad puede estimularse con la adición de probióticos (Bañuelos *et al.*, 2021) (**Cuadro 2**).

En cuanto a la cepa de tilapia cultivada genéticamente mejorada (GIFT), Haridas y colaboradores reportaron en 2017 que la tecnología biofloc ofrece parámetros de porcentaje de supervivencia, peso corporal medio, tasa de crecimiento específica, porcentaje de ganancia de peso y ganancia diaria de peso significativamente mejores que los observados en cultivos convencionales. Así mismo, identificaron densidades poblacionales de 200-250 organismos/m³ como las óptimas para esta cepa en particular, pero sin comprometer el crecimiento ni la inmunidad hasta en densidades de 350 organismos/m³ (**Cuadro 2**).

Por otro lado, en 2020, Sgnaulin y colaboradores evaluaron el desempeño de la tilapia de cultivo genéticamente mejorada (GIFT) en fase de crianza bajo sistema biofloc con diferentes niveles de proteína y energía digestible en la dieta. Los resultados sugieren que la cantidad adecuada de estos nutrientes para no afectar la salud ni el rendimiento de los peces y optimizando el aprovechamiento de estos es de 26% de proteína digestible y 3,000 kcal de energía digestible por kilogramo (Sgnaulin *et al.*, 2020) (**Cuadro 2**).

En 2023, Solanki y su equipo de trabajo realizaron un experimento en el que evaluaron el desempeño del crecimiento y la respuesta inmune de tilapias cepa GIFT con suministro de alimento en diferentes patrones (alimentación diaria, en días alternos, cada tercer día o sin alimentación). Concluyeron que la alimentación diaria en cultivos de tilapia GIFT con tecnología biofloc, favorece el crecimiento y provoca una buena respuesta inmunológica en los organismos (**Cuadro 2**).

En lo que respecta al uso de aditivos, Zabidi y colaboradores hicieron un estudio en 2021 con tilapia híbrida roja (*Oreochromis* spp.) en el que evaluaron el efecto de la adición de probióticos en estanques con tecnología biofloc sobre el desempeño en el crecimiento y la calidad del agua (**Cuadro 6**), esperando además tratar y prevenir enfermedades bacterianas como la estreptococosis sin requerir una aplicación constante del probiótico para garantizar concentraciones óptimas, pues el microorganismo efectivo puede proliferar más en estanques con la tecnología biofloc. Los microorganismos utilizados como probióticos fueron *Lysinibacillus fusiformis* SPS11, *Bacillus amyloliquefasciens* L9 y *Enterococcus hirae* LAB3, probióticos comerciales (*Lactobacillus* sp., *Aztobacter* sp., *Azospirillum* sp.) y probióticos mixtos (mezcla de las tres bacterias), obteniéndose de esta última los mejores resultados en cuanto a la inhibición de patógenos (*Streptococcus agalactiae* y *Streptococcus iniae*), la supervivencia tras desafío con *S. agalactiae*, tasa de crecimiento específico, tasa de conversión alimenticia (**Cuadro 2**) y calidad de agua (concentración de nitrógeno significativamente menor) (Zabidi *et al.*, 2021) (**Cuadro 4**).

En 2022, Phan y su equipo de trabajo, cultivaron juveniles de tilapia del Nilo en estanques de tierra con diferentes revestimientos de polietileno de alta densidad bajo sistema biofloc. Adicionaron una mezcla de probióticos de *Bacillus* spp. (**Cuadro 6**), obteniendo como resultado que la combinación entre aplicación de tecnología biofloc y de prebióticos puede mejorar la eficiencia del cultivo en estanques de tierra, manteniendo bajos los índices de conversión alimenticia (1.27) y excelente calidad del pescado obtenido a la cosecha (**Cuadro 2**).

Van Doan y colaboradores, por otra parte, reportaron en 2021 que al adicionar los cultivos con tecnología biofloc con piel plateada del café (residuo del proceso de tostado del café), ocurre una mejora significativa en la tasa de crecimiento específica, la ganancia de peso y el peso final de las tilapias del Nilo (**Cuadro 2**). Así mismo, este aditivo genera una mejora significativa en la inmunidad y resistencia a enfermedades, de manera que continuar con las investigaciones en el rubro de los aditivos al sistema biofloc cobra gran relevancia.

3.7 Bienestar y biofloc

Es conocido que el nivel de estrés en los organismos de cultivo puede ser estimado mediante la medición de los niveles de glucosa, cortisol sérico y enzimas indicadoras de daño hepático (ALT y AST) y se ha observado que en las tilapias del Nilo sometidas a distintos tipos y niveles de estrés, se reportan aumentadas (Haridas *et al.*, 2017; Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; Shourbela *et al.*, 2021). En contraste, estos mismos parámetros medidos en individuos criados bajo sistemas con tecnología biofloc se muestran disminuidos, además de que la actividad de la enzima hepática ALP (enzima multifunción indicadora del estado inmunitario y con papel metabólico crítico) aumenta significativamente (Shourbela *et al.*, 2021; Sarsangi Aliabad *et al.*, 2022), aun cuando la densidad de crianza es elevada, por lo que se puede concluir que la tecnología biofloc ofrece la oportunidad de reducir los niveles de estrés en los organismos de cultivo, mejorando a la vez los parámetros productivos y la resistencia a enfermedades, posiblemente debido al alto contenido de nutrientes en los bioflóculos (Haridas *et al.*, 2017; Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; Shourbela *et al.*, 2021). Las condiciones de estrés por hacinamiento y desnutrición generan sobreproducción de radicales libres que derivan en daño al ADN de las células del sistema inmune, debilitando sus funciones. Además, los factores estresantes son capaces de disminuir los niveles de lisozima en suero y riñones (Sarsangi Aliabad *et al.*, 2022). Se ha demostrado que, en sistemas con tecnología biofloc se muestra un aumento significativo de la actividad de elementos antioxidantes como ácidos grasos poliinsaturados, carotenoides, vitaminas (C y E), minerales (Se y Zn), así como las enzimas superóxido dismutasa (SOD), glutatión reductasa (GR) y catalasa (CAT) que pueden ayudar a disminuir el daño celular generado por el estrés y mejorar la eficiencia del sistema de defensa, especialmente cuando la fuente de carbono externa que se adiciona es glicerol o melaza (Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; Shourbela *et al.*, 2021; Sarsangi Aliabad *et al.*, 2022).

Otro elemento de importancia para medir el estado de los peces sometidos a cultivos densamente poblados es la detección de genes relacionados con el sistema

inmunitario y proinflamatorio, que están asociados con la respuesta de los peces ante condiciones de estrés. Estos genes promueven la adherencia de los neutrófilos a células endoteliales, la capacidad quimioatrayente de los neutrófilos, la liberación de histamina y la migración a los sitios de inflamación. La fuente de carbono aplicada y la densidad poblacional dentro de los sistemas con tecnología biofloc tienen un efecto importante sobre la expresión de estos genes, siendo la melaza y las bajas densidades las que la favorecen. (Shourbela *et al.*, 2021).

3.8 Medición del volumen de bioflóculos presentes en el agua y técnicas de observación de microorganismos

Para la medición del volumen de bioflóculos dentro de un sistema con tecnología biofloc se pueden utilizar conos Imhoff de sedimentación (Monroy *et al.*, 2013). Estos conos son transparentes y tienen graduaciones marcadas al exterior para la medición del volumen de sólidos asentados en sus vértices, a partir de un litro de agua. El intervalo de tiempo sugerido para realizar la medición es de 10 – 20 minutos. En los cultivos de tilapia, se requiere que la concentración de sólidos sedimentables se mantenga entre 25 - 50 ml/L para mantener su funcionamiento, conservando los suficientes flóculos (tan pocos como sean posibles para el control de los productos nitrogenados) como biofiltro para la regulación del amoníaco sin comprometer considerablemente la demanda de oxígeno (Hargreaves, 2013). Cuando la medición es menor a este rango la solución consiste en la adición de una fuente exógena de carbohidratos y si por el contrario, se presenta un resultado mayor a lo indicado, se deberá aumentar la eliminación de lodos (Avnimelech, 2011). El medidor de turbidez también permite estimar la cantidad de sólidos presentes en el sistema. Si la concentración de sólidos se mantiene en niveles relativamente bajos, la fotosíntesis llevada a cabo por las microalgas aportará oxígeno al sistema (Hargreaves, 2013).

En cuanto a la caracterización, existen varias técnicas para determinar los principales grupos de microorganismos en los bioflóculos como microscopía,

epifluorescencia y cromatografía de gases, siendo la primera la más socorrida, ya que permite la identificación visual de los componentes vinculados a los flóculos, pudiéndose observar bacterias degradantes de nitrógeno como *Nitrospira* sp. *Nitrobacter* sp. y *Bacillus* sp., bacterias patógenas (en niveles relativamente bajos), microalgas, zooplancton, coloides, polímeros orgánicos y células muertas que son consumidas por las especies cultivadas (Monroy *et al.*, 2013; Betanzo-Torres *et al.*, 2020).

También es posible aplicar otras tecnologías para la identificación de microorganismos como la electroforesis en gel en gradiente desnaturizante (DGGE), o la secuenciación de alto rendimiento (genes ribosomales), que es una herramienta científica prometedora para analizar los genomas complejos contenidos en las comunidades microbianas. Otra técnica novedosa es la secuenciación en tiempo real de una sola molécula (SMRT) que posee ventajas de precisión sobre la secuenciación de alto rendimiento. Dado el alto costo de estas tecnologías su uso aún no es común en las disciplinas agroindustriales como la acuicultura, pese a que aumentan la profundidad y cobertura del estudio de la diversidad microbiana de este tipo de conglomerados (Emerenciano *et al.*, 2017).

3.9 Microorganismos típicamente reportados en la tecnología biofloc

La identificación y caracterización de las comunidades microbianas en los cultivos con tecnología biofloc es primordial para la comprensión de los roles ecológicos, orientado hacia el mejor manejo de los bioflóculos en los sistemas de acuicultura. Los microorganismos que se reportan en las producciones que utilizan tecnología biofloc son principalmente microalgas, bacterias de diversos géneros y levaduras, protozoarios, rotíferos, copépodos y nemátodos (**Cuadro 7**). En sistemas con mínimo o nulo recambio de agua, la estabilidad depende de la interacción dinámica entre estas comunidades microbianas, que se producirán de forma natural en el sistema. Estos consorcios de microorganismos contribuyen con el mantenimiento

de la calidad del agua y el reciclaje de los desechos de materia orgánica y nitrógeno para producir un alimento de alto valor nutricional (Emerenciano *et al.*, 2017). Todos los grupos anteriormente mencionados poseen funciones específicas dentro del sistema y tienen fluctuaciones importantes a lo largo del ciclo productivo, de acuerdo con las condiciones del sistema y de los microorganismos predominantes en los diferentes momentos (Emerenciano *et al.*, 2013). En sistemas densamente poblados por microorganismos, hay 10^{7-10} células bacterianas/ml, las bacterias se adhieren al resto de los organismos y a las partículas orgánicas, formando los flocos cuyo tamaño puede variar desde 0.1 hasta 0.6 mm y que pueden ser aprovechados por las tilapias cultivadas (Avnimelech, 2011).

De acuerdo con el organismo cultivado y las condiciones específicas del cultivo (calidad del agua, densidad poblacional, recambios de agua, tipo e intensidad de la iluminación, especie cultivada y carbohidrato adicionado), se pueden observar diferentes patrones de presentación en la riqueza, abundancia y composición de las comunidades microbianas. La densidad del biofloc, por ejemplo, es mayor en cultivos de interior que en cultivos de exterior (Xu *et al.*, 2021). A diferentes rangos de pH se seleccionan diferentes poblaciones microbianas, favoreciendo de forma importante la capacidad de respuesta ante cambios ambientales, así como la de regulación de la absorción y metabolismo de nutrientes. Tanto la diversidad de organismos presentes en el medio acuático como la calidad del agua, favorecen el establecimiento y adaptación fisiológica de grupos específicos (Martins *et al.*, 2019). El estudio a profundidad de estos aspectos sentaría las bases biológicas para la obtención de cultivos en biofloc con un consorcio de microorganismos específicos que mejorarían el desempeño de la especie y la eficiencia del sistema (Gallardo-Collí and Pérez-Rostro, 2019).

Hasta el momento se han estudiado particularmente a las comunidades bacterianas dado su papel principal como degradadoras y recicladoras de materia orgánica, fuente de alimento y / o probióticos (Gallardo-Collí and Pérez-Rostro, 2019); se requiere que determinados consorcios microbianos estén presentes en el agua en cantidad suficiente para que los procesos de reciclaje de nutrientes se lleven a cabo

correctamente (Avnimelech, 2011). Sin embargo, se sabe que los demás microorganismos también contribuyen ampliamente al funcionamiento del sistema; por ejemplo, las microalgas aportan oxígeno y sintetizan biomasa a partir de amoníaco y dióxido de carbono; los flagelados y ciliados controlan la biomasa bacteriana y favorecen la formación de flóculos; las amebas, rotíferos y nemátodos aumentan la precipitación de sólidos sedimentables y reducen el volumen de lodos, complementando al sistema de biofloc con su participación en el reciclaje de materia orgánica y como parte de redes tróficas complejas que incluyen a las especies cultivadas. Además, la comunidad de microeucariotas es una fuente importante de macro y micronutrientes (Emerenciano *et al.*, 2017; Gallardo-Collí and Pérez-Rostro, 2019).

Una práctica actual en sistemas acuícolas que utilizan esta tecnología es el uso de consorcios comerciales de bacterias que promueven la estabilización de la comunidad heterótrofa, compiten con los microorganismos autótrofos en las fases iniciales y contribuyen al reciclaje de materia orgánica, control de sólidos y niveles de nitrógeno totales (Emerenciano *et al.*, 2017), permitiendo que la preparación de los estanques para producción sea más fácil y rápida.

3.9.1 Bacterias

Bajo condiciones adecuadas de temperatura, relación C:N, o pH, las bacterias tienen un crecimiento rápido (Emerenciano *et al.*, 2017). Dentro de los sistemas acuícolas con tecnología biofloc se pueden encontrar habitantes comunes de ambientes acuáticos y que proliferan especialmente en presencia de sobrecarga de materia orgánica (**Cuadro 7**), como los géneros bacterianos *Aeromonas* y *Vibrio* que pueden dar problemas al tornarse virulentos, causando enfermedades en diferentes organismos acuáticos; también están presentes organismos relacionados con la formación de flóculos, como las bacterias filamentosas *Microthrix* que ocasionalmente pueden presentarse en gran abundancia en los bioflóculos en un fenómeno conocido como “abultamiento filamentoso” provocando que el asentamiento de estos se haga más lento y dificultando el control del volumen de

sólidos, así como provocando obstrucciones branquiales (Hargreaves, 2013; Monroy *et al.*, 2013); por otra parte se presentan bacterias oxidadoras de amoníaco en ambientes acuáticos como los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus*, y *Nitrosovibrio*; bacterias oxidadoras del nitrito el cual metabolizan a nitrato como: *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, y *Nitrospina* EMERENCIANO 17 hasta aquí, así como *Bacillus*; y otras comunidades microbianas heterótrofas altamente capacitadas para la degradación de materia orgánica, pues obtienen carbono a partir de esta, como los géneros bacterianos *Sphingomonas*, *Pseudomonas*, y *Micrococcus* (Monroy *et al.*, 2013). El crecimiento de los grupos de bacterias heterótrofas y quimiolitotótrofas se lleva a cabo de manera ideal en un rango de pH de entre 7 y 10, específicamente a 7 y 8 respectivamente (Martins *et al.*, 2019). Se sabe que las bacterias cocoides asimilan muy eficientemente los nutrientes debido a su pequeño tamaño y mayor relación superficie-volumen (Emerenciano *et al.*, 2013).

La tecnología biofloc ofrece el beneficio adicional de aportar un efecto probiótico a través de los microorganismos y sus componentes celulares, que actúan con un efecto positivo en el crecimiento y estimulando al sistema inmune. Debido a lo anterior, el biofloc genera un mejor rendimiento de crecimiento, respuesta inmunitaria, estado antioxidante y resistencia al estrés (Shourbela *et al.*, 2021).

La presencia de los géneros bacterianos degradadores de nitritos como *Nitrospira* sp, *Nitrobacter* sp y *Bacillus* sp está asociada al mantenimiento de los parámetros óptimos de calidad del agua de cultivo, pero además existe evidencia de que, al ser dominantes en este tipo de sistemas, se logra un biocontrol muy efectivo sobre los microorganismos patógenos. Entre las bacterias existe un comportamiento conocido como exclusión competitiva de las poblaciones bacterianas heterótrofas que parecen suprimir el crecimiento de bacterias potencialmente patógenas como los géneros *Aeromonas* y *Vibrio*, impidiendo que su descontrolada proliferación enferme a los organismos cultivados. Se observa que, al incrementarse los conteos de microorganismos heterótrofos, los de los otros géneros disminuyen hasta desaparecer del sistema. Este es uno de los importantes beneficios de la tecnología

biofloc. (Monroy *et al.*, 2013). Por otra parte, el género *Bacillus* tiene efectos probióticos conocidos, ya que secreta una amplia variedad de exoenzimas y polímeros, como el poli- β -hidroxibutirato (exo-polisacárido con efecto probiótico similar a los ácidos orgánicos) que generan un ambiente hostil a otras bacterias, particularmente patógenas, generando un mayor bienestar de las especies cultivadas. Este exo-polisacárido es sintetizado en cantidad mayor cuando la bacteria se encuentra en estado de estrés fisiológico o nutricional y puede representar hasta un 80% de la materia seca de las células bacterianas y un 16 % de la materia seca del biofloc (Monroy *et al.*, 2013). La presencia en los bioflóculos de comunidades bacterianas beneficiosas, como *Bacillus* y *Lactobacillus* también puede promover la inmunocompetencia de los peces cultivados (Mirzakhani *et al.*, 2019). Por otra parte, los flóculos contienen peptidoglicano y lipopolisacáridos que, al igual que el poli- β -hidroxibutirato, tienen el potencial de promover el crecimiento de los peces. Además, los flóculos poseen propiedades probióticas que contribuyen con la digestión y absorción del alimento balanceado en el tracto digestivo de los organismos de cultivo (Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022).

La ecología microbiana de los bioflóculos se comprende solo al nivel más básico. Particularmente el papel de los flóculos en el control de bacterias patógenas requiere mayor investigación. El grupo bacteriano *Vibrio*, por ejemplo, puede acumularse en los sistemas de biofloc y puede activar e inactivar su capacidad de causar enfermedades. Este cambio ocurre independientemente de las concentraciones de sólidos presentes (Hargreaves, 2013).

Las bacterias heterótrofas provocan menor densidad de los bioflóculos y utilizan los compuestos orgánicos (azúcar, alcohol, ácidos orgánicos, o sustancias específicas como celulosa, quitina, lignina, entre otras) como fuente de energía en forma de carbono, por lo que para estimular su crecimiento se agrega a los cultivos una fuente de carbono suplementaria o se reduce el nivel de proteína agregado en el alimento con el propósito de generar una demanda de nitrógeno por parte de las bacterias, que lo toman del amoníaco y otros productos nitrogenados presentes en el medio acuático minimizando su acumulación en la columna de agua y permitiendo su

incorporación a la cadena trófica en forma de biomasa bacteriana (nuevas células bacterianas que fungen como una fuente de proteína) que es consumida por los organismos detritívoros. Una relación C:N de 12-15:1 o superior (se ha encontrado que alcanzar una relación de C:N de 20:1 no aporta beneficios adicionales, puesto que si se mantiene en 15:1, los compuestos nitrogenados se mantienen estables en niveles no tóxicos) favorece el desarrollo de la vía heterotrófica para el control de los niveles de amoníaco, siendo esta considerada la más estable y confiable respecto a la captación de amoníaco por microalgas o la vía de nitrificación (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017; Mirzakhani *et al.*, 2019), además, los consorcios heterotróficos se desarrollan a gran velocidad tras la aparición de materia orgánica en el agua (Avnimelech, 2011).

El proceso de reciclaje de nutrientes se lleva a cabo mediante la colonización y aprovechamiento de las heces, los organismos muertos y los alimentos no consumidos, provocando que las bacterias heterótrofas adquieran una función primordial en las redes tróficas al interior del sistema (Emerenciano *et al.*, 2017). El control de los niveles de amoníaco por bacterias heterótrofas ocurre en horas o días cuando se agrega la cantidad adecuada de carbono, pero el “empaquetamiento” del nitrógeno es temporal y el ciclo de reciclaje corto, puesto que la descomposición de esta misma biomasa bacteriana y su eliminación tras ser ingerida produce amoníaco y exceso de sólidos (Hargreaves, 2013).

La comunidad bacteriana quimiolitoautótrofa obtiene energía mediante la oxidación de compuestos nitrogenados tóxicos a través de un proceso conocido como nitrificación en el que se catabolizan compuestos nitrogenados altamente tóxicos a una forma que únicamente genera toxicidad en altas concentraciones (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017; García, Miranda and Coelho, 2019). Este grupo bacteriano utiliza carbono inorgánico, principalmente de las especies químicas que generan la alcalinidad para realizar el proceso de nitrificación en dos pasos, oxidando primero el amonio a nitrito y posteriormente a nitrato. Aunque el establecimiento y crecimiento de las bacterias tiende a ser lento e inconsistente, este proceso suele ser confiable, teniendo como ventaja sobre la vía heterótrofa que

no se generan tantos sólidos y se consume menos oxígeno (Martins *et al.*, 2019). Las bacterias nitrificantes son naturalmente promovidas por la presencia de amoníaco y nitrito, así como por la acumulación de materia floculada que funge como sustrato para las mismas (Emerenciano *et al.*, 2017). La comunidad nitrificante se desarrolla lentamente, en alrededor de 4 semanas sin la adición de un inóculo (Avnimelech, 2011). En el largo plazo, el proceso de nitrificación define el destino del 25 a 50% del nitrógeno presente en el sistema, a diferencia de la interacción en el corto plazo que se produce entre estos compuestos y las células bacterianas nitrificantes y microalgas (Hargreaves, 2013). Como se mencionó anteriormente, el metabolismo de estos microorganismos provoca una disminución de la alcalinidad (capacidad del agua para amortiguar cambios de pH al adicionar ácidos o bases), que debe ser compensada mediante la adición regular de compuestos como bicarbonato de sodio, carbonato de calcio, hidróxido de calcio (Emerenciano *et al.*, 2017) o mediante el uso de un reactor de desnitrificación que puede incrementar considerablemente el costo de producción del sistema. El proceso que se lleva a cabo al interior de estos reactores se basa en la retención de sólidos para su sedimentación, que generará condiciones anóxicas en donde el constante suministro de nitrato provoca la oxidación de la materia orgánica y al añadirse una fuente de carbono orgánico simple, dará lugar a la liberación de bicarbonato, provocando que la alcalinidad perdida por la nitrificación se recupere mediante desnitrificación (Hargreaves, 2013). De no compensarse esta disminución en la alcalinidad, el nivel de pH puede descender de forma abrupta, inhibiendo bacterias como las nitrificantes, provocando acumulación de amoníaco y su consecuente impacto sobre los organismos de cultivo (Hargreaves, 2013).

3.9.2 Hongos y levaduras

En la tecnología biofloc también se reporta la presencia de hongos y levaduras (**Cuadro 7**) que son organismos quimioorganotróficos que requieren formas orgánicas de carbono como azúcares, polioles, ácidos orgánicos y grasos, alcoholes alifáticos, entre otros compuestos heterocíclicos y poliméricos como fuente de energía (Emerenciano *et al.*, 2017). Uno de los organismos encontrados en abundancia en los sistemas biofloc es la levadura *Rhodotorula* sp., que contribuye en el control de microorganismos patógenos (Monroy *et al.*, 2013).

3.9.3 Microalgas

En los sistemas de producción con tecnología biofloc que se encuentran expuestos a la luz solar se produce una densa floración de algas (**Cuadro 7**), pues al formar parte de la comunidad fotoautotrófica, las microalgas captan la energía solar para producir energía química en forma de carbohidratos y los productos nitrogenados como amoníaco y nitrato liberados debido a la presencia de materia orgánica en descomposición, para generar biomasa, además consumen dióxido de carbono y producen oxígeno, por lo que juegan un papel muy importante en el sistema de biofloc. (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017). La captación de productos nitrogenados por este grupo está fuertemente influenciada por la intensidad de la luz que llega bajo el agua, por lo que, si hay días nublados durante periodos prolongados o alta acumulación de flóculos que hagan sombra, puede limitarse la absorción de estos y presentarse picos de amoníaco y nitratos (Hargreaves, 2013; Choo and Caipang, 2015). En cultivos de biofloc las microalgas pueden vivir como células libres en la columna de agua o formar agregados (Emerenciano *et al.*, 2017) y cuando estas predominan en el sistema hay intensas fluctuaciones de oxígeno disuelto y pH, independientemente de la aireación aplicada (Hargreaves, 2013).

Se observan microalgas clorofitas que empiezan a colonizar el sistema incluso antes de la formación de los flóculos, no son tóxicas; también diatomeas que suelen observarse fuertemente adheridas a los flóculos y son consideradas beneficiosas

en los cultivos acuícolas, pues son una nutritiva fuente de alimento para la mayoría de los animales acuáticos; así como cianobacterias que son productoras primarias o descomponedoras, por lo que poseen gran relevancia para la circulación de nutrientes, incorporando nitrógeno a la cadena trófica, sus concentraciones varían según el tipo de biofloc (Monroy *et al.*, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017). Las diatomeas y cianobacterias pueden formar agregados de hasta 2 mm de diámetro (Emerenciano *et al.*, 2017). En presencia de concentraciones excesivas de nitrógeno y fósforo en los estanques de acuicultura, se pueden producir floraciones incontroladas de microalgas, particularmente cianobacterias, que producen compuestos tóxicos para los animales acuáticos y pueden provocar sabores desagradables en las especies cultivadas (Emerenciano *et al.*, 2017).

En diferentes estudios se ha reportado abundancia dominante de los tres diferentes tipos de microalgas, pudiendo deberse a la cantidad y calidad de los nutrientes presentes en el medio, las condiciones del agua como la salinidad, la relación C:N, la irradiación solar, así como al control selectivo que tienen determinadas especies de rotíferos y ciliados sobre las microalgas al consumirlas (Emerenciano *et al.*, 2013; Monroy *et al.*, 2013; García, Miranda and Coelho, 2019). Por ejemplo, el carbono orgánico influye en la composición de las microalgas, promoviendo el predominio de diatomeas que tienen una alta calidad nutricional (García, Miranda and Coelho, 2019).

Los factores que impactan en el valor nutricional de las microalgas incluyen su tamaño, forma, digestibilidad, composición bioquímica y compuestos bioactivos como enzimas, vitaminas y antioxidantes. Su importancia nutricional radica principalmente en su contenido de ácido docosahexaenoico (DHA), ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido araquidónico (AA), que son esenciales para varias especies cultivadas (Emerenciano *et al.*, 2017), además de que son un nutriente importante para los seres humanos, quienes buscan estos ácidos grasos saludables en los productos de origen acuícola.

Se sabe que las microalgas tienen un impacto sobre las variaciones de alcalinidad y pH en el medio acuático, pues consumen CO₂ para la síntesis de biomasa, provocando aumento de pH (Gallardo-Collí and Pérez-Rostro, 2019).

3.9.4 Zooplancton

Los protozoarios son un grupo de microorganismos de gran relevancia en el sistema biofloc (**Cuadro 7**). Se sabe que los protozoarios actúan como depredadores de fitoplancton, hongos y bacterias y que son una fuente de alimento para los metazoarios (Emerenciano *et al.*, 2013).

Los ciliados (grupo más representativo de protozoarios en la naturaleza) se alimentan de bacterias, cianobacterias, fitoplancton y otros organismos pertenecientes al zooplancton; a su vez, los ciliados pueden fungir como excelente fuente de alimento vivo para las etapas juveniles o adultas de algunos animales acuáticos como peces y camarones (Monroy *et al.*, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017). Se han reportado los géneros *Paramecium*, *Colpidium*, *Stylonychia*, *Vorticella*, *Epystilis* y *Halteria* en cultivos de tilapia (Monroy *et al.*, 2013). Se sugiere que las variaciones en la presentación de los organismos desarrollados y en la concentración de estos están relacionadas con las condiciones del medio acuático, entre las que destaca la salinidad, los elementos que producen los flóculos, como la fuente de carbono, el tipo de alimento balanceado suministrado, el tiempo de cultivo y la especie cultivada (Monroy *et al.*, 2013).

Los copépodos se alimentan de bacterias, fitoplancton, detritos o cualquier otro material orgánico de menor tamaño. Se sugiere que sus propiedades nutricionales varían de acuerdo con las microalgas utilizadas como alimento (Emerenciano *et al.*, 2017).

Los cladóceros (por ejemplo, *Daphnia* sp) consumen una amplia variedad de fitoplancton y materia en suspensión. Tienen un importante papel en las redes tróficas, pues logran reducir la abundancia de fitoplancton en la columna de agua y además adicionan una gran cantidad de proteínas en los cultivos con tecnología

biofloc, pudiendo ofrecer un aporte proteico de hasta el 60% (Emerenciano *et al.*, 2017).

De los rotíferos, se reporta la presencia de los géneros *Philodinia*, *Lecaene* y *Keratella*, cuya alimentación consiste en microalgas, bacterias, levaduras y protozoarios. Se sugiere que este grupo está frecuentemente asociado al biofloc, ya que pueden fragmentar los flóculos y consumir las bacterias adheridas, además de que el mucílago producido en sus excreciones contribuye a la formación de nuevos flóculos (Monroy *et al.*, 2013). Este grupo se ha utilizado en gran medida para reemplazar a la artemia como alimento natural exógeno en el cultivo larvario de crustáceos y peces (Emerenciano *et al.*, 2017).

3.9.5 Nemátodos

Los nemátodos son una abundante fuente de alimento vivo disponible las 24 horas del día que aporta una gran cantidad de proteína cruda y ácidos grasos esenciales a la dieta de los organismos cultivados, convirtiéndolos en un grupo de gran importancia nutricional para el sistema biofloc. Este grupo se alimenta de bacterias y otros microorganismos bentónicos. Se menciona que su abundancia está determinada por la presencia de diferentes ciliados como *Paramecium* y *Colpidium*, ya que son su fuente de alimento, así como por la tasa de consumo de los peces cultivados (Monroy *et al.*, 2013).

3.10 Interacciones, funciones y sustratos sobre los que actúan los microorganismos en el sistema biofloc

Como se ha mencionado, en los cultivos al aire libre se puede observar que el agua varía entre el color verde y el marrón, pues están compuestos principalmente por microalgas y contienen pocas bacterias, mientras que en cultivos en interior el agua se observa principalmente marrón con predominancia de partículas agregadas colonizadas por bacterias densas (Xu *et al.*, 2021).

En cultivos de bajo recambio de agua se generan biopelículas complejas en las que coexisten las bacterias heterótrofas y nitrificantes. Los iones inorgánicos son atraídos hacia la superficie de estas biopelículas y las superficies sólidas del sustrato, promoviendo mayores procesos de nitrificación en estas zonas (Emerenciano *et al.*, 2017).

Hay evidencias de relaciones de mutualismo, competencia, depredación y comensalismo, entre otras, de algunos grupos de microorganismos con otros dentro de los sistemas con tecnología biofloc. Tal es el caso de algunas cepas bacterianas con efecto positivo en el crecimiento de microalgas; las diatomeas bentónicas (adheridas) cuyos polisacáridos extracelulares pueden ser utilizados por organismos heterótrofos como fuente de carbono (Emerenciano *et al.*, 2017); las cianobacterias filamentosas que liberan sustancias inhibitoras de otros microorganismos como fitoplancton y bacterias pequeñas para ganar la competencia por el sustrato (Emerenciano *et al.*, 2013); o las comunidades microbianas heterótrofas como los géneros bacterianos *Sphingomonas*, *Pseudomonas*, *Micrococcus* y *Bacillus*, y la levadura *Rhodotorula* sp, que son capaces de impedir la proliferación de los géneros potencialmente patógenos (Monroy *et al.*, 2013).

El flujo de energía de la comunidad microbiana está fuertemente influenciado por bacterias y protozoarios quienes desempeñan un papel primordial en el reciclaje de materia orgánica en el sistema. Ambos grupos se encuentran en la base de la transferencia trófica de energía a los niveles más altos, dando lugar a un flujo

alternativo de nutrientes conocido como “bucle microbiano” (Emerenciano *et al.*, 2013, 2017). En otras palabras, una parte sustancial de la producción primaria (organismos autótrofos) se transforma en materia orgánica disuelta, que es utilizada por las bacterias, jugando así un papel muy importante en el reciclaje de elementos de la columna de agua comparable con el de los productores primarios. A su vez, estas bacterias son consumidas por protozoarios, entrando así finalmente en la red trófica formada por organismos mayores como el zooplancton, que, junto con las cianobacterias, protozoarios, copépodos y nemátodos son conocidos por ser alimentos naturales para los organismos cultivados (Emerenciano *et al.*, 2013; Villate, 2017).

Se ha observado que las altas concentraciones de protozoarios se relacionan con bajas concentraciones de cianobacterias filamentosas y de nemátodos, sugiriendo una relación estrecha entre estos grupos. La variación en la salinidad puede causar el predominio de ciertos grupos de protozoarios, por ejemplo, ciliados sobre flagelados (Emerenciano *et al.*, 2013).

Las cianobacterias tienen ventaja competitiva en aguas ricas en fósforo, nitrógeno y de alta turbidez; de la misma manera se ven favorecidas con la adición de carbono orgánico, que contribuye con el crecimiento tanto de las cianobacterias como de los protozoarios. También se sabe que la relación de las bacterias con las algas es determinante de los grupos que se desarrollan en el ambiente acuático, de manera que el aumento de bacterias heterótrofas que metabolizan el carbono, permite que el número de diatomeas en el sistema se incremente, pero restringe a su vez a otros grupos de algas como las cianobacterias (Emerenciano *et al.*, 2013).

3.11 Calidad nutricional de los bioflóculos

Algunos factores con potencial para modificar la calidad nutricional del biofloc son la salinidad, la fuente de carbono externa, los cambios en la comunidad microbiana, si el cultivo se realiza en condiciones de exterior o de interior (Xu *et al.*, 2021), así como la fuente e intensidad de la luz, por lo que los valores de nutrientes también tienen importantes variaciones a lo largo del ciclo productivo (Emerenciano *et al.*, 2013). Es sabido que los parámetros del agua también tienen una influencia resaltable sobre la composición aproximada de los bioflóculos. Por ejemplo, un nivel de pH de 6.5 induce un aumento en el contenido de proteína cruda y cenizas respecto a valores de pH de 7.5 y 8.3 (PC 19.47 vs. 16.76 y 16.36 respectivamente) (Martins *et al.*, 2019).

Se ha observado que la cantidad de proteína y lípidos crudos que aportan los bioflóculos está relacionada con las concentraciones de copépodos, nemátodos y cianobacterias filamentosas, dando cuenta de que la dinámica de los microorganismos afecta la calidad nutricional del biofloc y consecuentemente el crecimiento de los organismos cultivados. Sin embargo, se necesita más investigación en este campo (Emerenciano *et al.*, 2013). También se sabe que cuantas más clarificaciones de agua se realicen, existirá una mayor remoción de bioflóculos, provocando a su vez que la cantidad de nutrientes disponibles en el sistema se reduzcan (Martins *et al.*, 2019).

El contenido de proteína en peso seco del biofloc fluctúa entre 25 y 50%, con la mayoría de las estimaciones entre el 30 y 45%. Con esta cantidad de proteína disponible, los bioflóculos poseen la capacidad de cubrir hasta el 50% de las necesidades de este nutriente en la dieta de la tilapia, permitiendo un enorme ahorro en alimentos acuícolas (Hargreaves, 2013; Shourbela *et al.*, 2021). Sin embargo, se reporta que los aminoácidos metionina y lisina pueden ser limitantes (Hargreaves, 2013).

Por su parte, el contenido de grasa varía entre el 0.5 y 15 %, con la mayoría de las estimaciones entre el 1 y 5%. Los bioflóculos proveen además un aporte considerable de vitaminas y minerales, particularmente fósforo (Hargreaves, 2013).

Se sabe que en un estanque de cultivo de tilapia promedio, incluso si solo la mitad del nitrógeno amoniacal total disponible en el sistema es asimilado por los microorganismos recicladores, el proceso reintegra 45 mg de proteína/L. Esta cantidad equivale al suministro del 25-30% de proteína incluida en una ración diaria de 150 mg/m³ de alimento balanceado, que representa un aporte importante en la alimentación de los organismos de cultivo, además de que los bioflóculos tienen la ventaja de ser alimento disponible continuamente para su aprovechamiento por los organismos en cultivo (Avnimelech, 2007; Mirzakhani *et al.*, 2019). Además de lo anterior, la proteína que aportan los bioflóculos es de alta digestibilidad, con una gran proporción de aminoácidos esenciales. También contienen componentes bioactivos como ácidos grasos esenciales, carotenoides y fitoesteroides y pueden contribuir en la producción de enzimas microbianas exógenas como las proteasas, así como inducir la generación de enzimas endógenas y enzimas digestivas con el potencial de mejorar la digestión y absorción de los nutrientes del alimento (Mirzakhani *et al.*, 2019).

En la actualidad se adiciona una gran diversidad de fuentes de carbono a los cultivos con tecnología biofloc para obtener una relación de C:N apropiada, por ejemplo, melaza, glucosa, almidón o glicerol y se ha llegado a la conclusión de que el uso de las diferentes fuentes de carbono afecta la composición nutricional del biofloc, además de su morfoestructura y su comunidad microbiana (Betanzo-Torres *et al.*, 2019).

3.12 Ventajas de la tecnología biofloc sobre la acuicultura convencional

La aplicación de la tecnología biofloc ha demostrado beneficios económicos y ambientales como mayor producción, ahorro de agua y reducción de la inversión en alimento comercial para los organismos cultivados en comparación con un sistema convencional (Betanzo-Torres *et al.*, 2019). Se puede hablar de que la producción de 1 kg de carne cultivada bajo tecnología biofloc utiliza la mínima cantidad de agua

(1.67-10.7 m³ de agua en un ciclo de producción de tilapia), es decir que el consumo de agua por kg de tilapia producido fue 42 veces menor en los estanques con tecnología biofloc que en los estanques convencionales (Ridha and Saburova, 2020). De acuerdo con el estudio realizado por García, Miranda and Coelho, 2019, la cantidad de agua requerida para producir un lote de 10,000 alevines se estima entre 6.1 y 7.8 m³, mientras que bajo el sistema tradicional asciende a 23.9 m³; por otra parte, el pienso granulado que debe suministrarse durante la producción de este lote se calcula entre 4.4 y 6.3 kg en el sistema de biofloc y en 10.7 kg bajo el sistema convencional.

Uno de los factores con mayor importancia en la nutrición de los organismos acuáticos es el contenido de proteína de la dieta. La mayoría de las especies de acuicultura requieren un contenido proteico en la dieta de entre 20 y 50% y se ha observado que el biofloc tiene valores nutricionales superiores a los de los alimentos comerciales, aportando aproximadamente 40% de proteína, permitiendo utilizar alimento balanceado con bajo porcentaje proteico e impactando favorablemente en el costo de producción. Se ha observado, además, que la proteína microbiana del biofloc tiene una mayor digestibilidad que la proteína presente en el alimento balanceado (Betanzo-Torres *et al.*, 2019).

Los microorganismos presentes en el sistema fungen también como carbohidratos prebióticos, capaces de mejorar la eficiencia del crecimiento al aumentar la proliferación de bacterias ácido lácticas beneficiosas en el intestino de los peces cultivados (Van Doan *et al.*, 2021), además de que existe evidencia de que la longitud y el diámetro de las vellosidades intestinales aumentan en peces cultivados en sistemas que usan tecnología biofloc, incrementando la superficie de absorción intestinal y mejorando en consecuencia el rendimiento en el crecimiento de las tilapias (Mirzakhani *et al.*, 2019; Shourbela *et al.*, 2021).

De acuerdo con el comportamiento de alimentación observado en las tilapias bajo sistema biofloc en comparación con peces cultivados en el sistema convencional, se reporta que al suministrar el alimento concentrado en estos últimos, los peces se abalanzan a gran velocidad y saltan para consumir los gránulos de alimento

(desaparecen en menos de 10 minutos), pues tienen hambre, contrario al caso de los peces en estanques de biofloc, que comen con calma (el alimento permanece flotando en el agua durante aproximadamente 30 minutos), dando cuenta de que no pasan hambre durante los periodos de ayuno, de manera que se espera mayor uniformidad de los organismos al final del ciclo productivo, pues aún los organismos pequeños que compiten con los más grandes por el alimento podrán consumir suficientes nutrientes para igualar su desarrollo (Avnimelech, 2007, 2011). Se estima que, para la tilapia, las raciones de alimento balanceado pueden reducirse alrededor de 20% en comparación con los sistemas de producción convencionales (Avnimelech, 2011).

Por otra parte, dada su alta calidad nutricional, el biofloc residual puede ser utilizado en forma de “harina de biofloc”, cuya composición proximal se ha estimado en (g/100 g de materia seca) 20.52-24.09 de proteína, 0.40-0.56 de lípidos, 42.45-44.63 de ceniza y 16.61-17.18 de fibra, con variaciones de acuerdo con el método de secado empleado (liofilización y secado al horno en este estudio) (Binalshikh-Abubkr, Hanafiah and Das, 2021). Este biofloc seco puede sustituir a la harina de pescado o de soya como ingrediente proteico en los alimentos acuícolas e incluso de otras especies animales (Hargreaves, 2013; Emerenciano *et al.*, 2017; Binalshikh-Abubkr, Hanafiah and Das, 2021). Desafortunadamente se dispone de cantidades limitadas de este recurso, de manera que es poco probable que supla a las fuentes de proteína animal o vegetal actualmente empleadas a escala comercial. (Hargreaves, 2013).

Otro uso potencial del agua con bioflóculos residual es el riego de cultivos agrícolas, aprovechando así tanto el recurso hídrico como los nutrientes. También puede reutilizarse para la preparación de los estanques del cultivo posteriores, ahorrando tiempo y recursos, y evitando además la descarga de aguas contaminadas a los afluentes aledaños, disminuyendo con esto el impacto ambiental. Sin embargo, no deben perderse de vista los riesgos sanitarios que sobrevienen al uso de esta alternativa, por ejemplo, la presencia de organismos patógenos que puedan

dominar el sistema y provocar enfermedades en los organismos del nuevo cultivo (Betanzo-Torres *et al.*, 2021).

La activación del sistema inmune ocurre mediante un aumento en determinadas moléculas que están involucradas en diferentes vías potencialmente relacionadas con el estrés oxidativo y la inflamación. (Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; Mirzakhani *et al.*, 2019; Shourbela *et al.*, 2021). Con relación a la prevención de enfermedades dentro del sistema de cultivo, se sabe que las bacterias y sus productos metabólicos, así como los factores nutricionales juegan un papel fundamental en la acción inmunoestimuladora en casos normales, pero se ha observado que mediante el uso de la tecnología biofloc se puede contribuir a promover la competencia inmunológica y el estado general de salud de los organismos en cultivo, ya que, entre otras ventajas como la alta calidad nutricional, los bioflóculos, pueden fungir como una fuente de compuestos bioactivos como carotenoides, clorofilas, bromofenoles y fitoesteroles con el potencial de mejorar los mecanismos de defensa de las especies acuáticas (Mirzakhani *et al.*, 2019; Guimarães *et al.*, 2021; Khanjani, Sharifinia and Hajirezaee, 2022). Lo anterior puede verse reflejado en los niveles elevados de proteínas séricas totales como albúminas, globulinas, transferrina, aglutininas, proteínas del complemento, proteínas de fase aguda, lisozima, antiproteasa y catalasa. Se sabe que los peces cultivados con tecnología biofloc tienen parámetros superiores en la actividad de estallido respiratorio (aumento en la demanda de oxígeno y consumo de energía en las células del sistema inmune para producir y liberar especies reactivas de oxígeno con capacidad microbicida), así como en la actividad de la enzima mieloperoxidasa (Haridas *et al.*, 2017; Mirzakhani *et al.*, 2019), que posee un efecto antibiótico natural directo sobre las bacterias Grampositivas, dada su acción lítica de la pared celular; e indirecto en contra de bacterias Gramnegativas a través de la activación del complemento y los fagocitos (por opsonización) tales como leucocitos polimorfonucleares o macrófagos (Haraz, El-Hawarry and Shourbela, 2018; Mirzakhani *et al.*, 2019).

Se ha reportado en juveniles de tilapia, que el uso de glicerol, almidón y melaza como fuentes de carbono, ya sea a altas o bajas densidades poblacionales, promueve un aumento considerable en los valores de recuento de glóbulos rojos, hemoglobina y volumen de sangre concentrada, sugiriéndose a la melaza como la que mejor promueve el rendimiento y la salud de la tilapia del Nilo, criado en un sistema de cultivo que utiliza la tecnología biofloc (Shourbela *et al.*, 2021). Adicionalmente, se ha demostrado que al combinarse el uso de esta tecnología con diferentes aditivos alimentarios, el rendimiento productivo, la inmunidad y la resistencia a las enfermedades puede verse significativamente mejorada (Van Doan *et al.*, 2021) (**Cuadro 1**).

Hablando sobre éxito productivo, una de las variables más utilizadas por los acuacultores para medir este rubro es el factor de Conversión Alimenticia, que indica la cantidad de alimento requerido para producir un kilogramo de carne. La tecnología biofloc ha probado en diferentes estudios tener un factor de conversión alimenticia con desempeño sobresaliente, así como una ganancia diaria de peso superior respecto a los cultivos convencionales. En cuanto a la productividad del sistema acuícola por unidad de superficie (kg/m^3), se espera que con la aplicación de este tipo de sistema se obtengan producciones de tipo intensivo a hiperintensivo (Haridas *et al.*, 2017; Betanzo-Torres *et al.*, 2019; Mirzakhani *et al.*, 2019).

Otro aspecto de gran relevancia es la supervivencia de los organismos en estanques con tecnología biofloc, ya que existen confirmaciones de que la implementación de esta tecnología a nivel comercial incrementa este parámetro en los organismos del cultivo, permitiendo tasas de supervivencia superiores al 95% (Betanzo-Torres *et al.*, 2019; Mirzakhani *et al.*, 2019; Van Doan *et al.*, 2021). Se debe tener especial cuidado en la alimentación, así como en el mantenimiento de la calidad del agua en las etapas iniciales del cultivo para evitar muertes durante la crianza y pre-engorde. Se sabe que con ciclos de cultivo largos aumenta la probabilidad de mortalidad (Betanzo-Torres *et al.*, 2019).

Comparando varias tecnologías productivas que son consideradas sostenibles, el sistema biofloc destaca por su aumento en la producción de hasta 2.3 veces

respecto a los sistemas convencionales, mayor productividad por unidad de volumen, así como menor inversión en alimento balanceado, agua y espacio (Crab *et al.*, 2007; Betanzo-Torres *et al.*, 2021). Además, dentro del sistema existen algunas especies de microalgas y bacterias capaces de participar en el proceso de secuestro de CO₂ atmosférico, mitigando así el impacto ambiental por liberación de gases de efecto invernadero (Ogello *et al.*, 2021). Los costos de inversión adicionales (cuando se tiene previamente instaurada una unidad productiva y se desea implementar una ecotecnología) son menores respecto a otras tecnologías sostenibles. Por otra parte, la tecnología biofloc ofrece un beneficio social, puesto que requiere la contratación de personal las 24 horas del día, generando empleos en la región donde se establezca (Betanzo-Torres *et al.*, 2021).

En conclusión, esta tecnología tiene una relación costo-beneficio que favorece la producción de tilapia. Permite el aumento en la producción y en la resiliencia de las unidades productivas. Es ambientalmente aceptable por su uso eficiente de energía, agua, tierra, así como secuestro de dióxido de carbono. Además, es socialmente factible por la generación de empleos. Lo anterior la convierte en una alternativa de ecotecnología resaltable sobre otras (sistemas de recirculación, humedales construidos para el tratamiento de agua y acuaponía) (Betanzo-Torres *et al.*, 2021; Ogello *et al.*, 2021).

3.13 Desventajas de la tecnología biofloc

Al basarse esta tecnología en el mantenimiento de los flóculos en funcionamiento, se requiere una gran cantidad de energía para los sistemas de aireación, tanto para el mantenimiento de los sólidos en suspensión como para el suministro de oxígeno para los microorganismos y los peces cultivados, convirtiéndose en un elemento vital. Lo anterior provoca que la tecnología no sea la opción de primera elección en regiones con un suministro de energía costoso o poco confiable (Hargreaves, 2013; García, 2021). Aunque es evidente el aumento en el uso de energía para el mantenimiento de la aireación en los sistemas con tecnología biofloc, debe puntualizarse que, por otro lado, existe un ahorro en la energía utilizada para el bombeo de agua, que puede llegar a ser muy significativo dependiendo de la ubicación de la fuente de agua, la distribución de los estanques en la unidad productiva y el tipo de sistema que se esté utilizando, por ejemplo en los sistemas de recirculación (Betanzo-Torres *et al.*, 2021).

Debe existir un seguimiento muy riguroso de la operación de los estanques y la posibilidad de una respuesta rápida, si no inmediata ante cualquier fallo en el sistema al momento de su detección, por lo que la identificación de problemas y anomalías debe ser también muy eficiente para evitar las consecuencias letales que podrían suscitarse en caso de que el problema se prolongue. También se requiere un control muy meticuloso de la calidad de agua, prestando especial atención al volumen de sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y productos nitrogenados, pues su desbalance puede provocar serias pérdidas en las unidades de producción. Se sabe, además, que el uso de la tecnología biofloc requiere un alto nivel de capacitación y conocimiento sobre los diferentes aspectos del sistema para la operación óptima de este (incluidos aspectos de microbiología y mantenimiento de calidad de agua sin recambios), de manera que se requiere que los productores cuenten con el equipo necesario y personal capacitado. Por lo anterior, su aplicación en la acuicultura se ha visto seriamente limitada (Betanzo-Torres *et al.*, 2021).

Pese a que una de las ventajas de la tecnología biofloc es la posibilidad de producir a altas densidades poblacionales, estas podrían generar una afectación en la ganancia diaria de peso y consecuentemente en el peso final, así como en el tiempo requerido para alcanzar el peso de cosecha. Lo anterior se asocia a la aglomeración entre los organismos producidos y al mayor uso de energía para el mantenimiento de la homeostasis que se ve perjudicada por las interacciones sociales (Guimarães *et al.*, 2021). Sin embargo, está demostrado que estas desventajas de los cultivos en altas densidades se ven atenuados con el uso de la tecnología biofloc respecto a producciones con sistema convencional (Shourbela *et al.*, 2021; Sarsangi Aliabad *et al.*, 2022).

3.14 Conclusiones

La tecnología biofloc ofrece la posibilidad de que el crecimiento acuícola se oriente hacia sistemas más eficientes, con mayor bioseguridad y respetuosos con el ambiente, además de socialmente responsables, debido a la oferta de empleos locales que puede generar. En este sentido, *Oreochromis niloticus* es una especie que destaca por su adaptación y rendimiento productivo cultivada en sistemas con esta tecnología.

Es conocido que las interacciones de las comunidades microbianas utilizan el nitrógeno disuelto de los residuos de los organismos cultivados y los alimentos no consumidos para transformarlos en proteína microbiana, manteniendo la calidad del agua y reduciendo los costos de alimentación, sin embargo, es importante analizar las condiciones de los cultivos en los que esta tecnología se ha desarrollado, como la fuente de carbono utilizada, la densidad poblacional en el cultivo o si se realiza en exterior o en invernadero con el objetivo de estandarizar técnicas y equipos que permitan facilitar la implementación de la misma y potenciar el éxito de la tecnología en cualquier parte del mundo.

El género *Oreochromis* spp. ha mostrado el mayor desempeño en los sistemas biofloc con una relación carbono-nitrógeno de 15:1, siendo además la más utilizada en los diferentes estudios consultados.

Respecto a la fuente de carbono, los autores difieren en la que ofrece un mayor beneficio en eficiencia productiva y bienestar, sin embargo, de los artículos consultados, son la harina de trigo, el azúcar y la harina de malta los que reportaron resultados superiores en estos rubros. Por otro lado, la melaza es la más frecuentemente empleada.

Entre las variables físico-químicas de calidad de agua que frecuentemente son analizadas destacan la temperatura (26 – 29°C), pH (6.3 – 8), oxígeno disuelto (4.0 – 7.0 mg/L), sólidos suspendidos totales (300 – 570 mg/L), nitrógeno amoniacal total (0.1 – 1.6 mg/L) y rangos muy amplios de nitritos y nitratos de acuerdo con el tipo

de microorganismos predominantes en el sistema, fuente de carbono empleada y densidad poblacional.

La mayoría de los autores refieren cultivos en invernadero para el mantenimiento de la temperatura del agua sin necesidad de calentadores, así como para facilitar el control de los elementos ambientales. Así mismo, muchos de los artículos mencionan la aplicación de cero recambio de agua en el sistema, aunque se reporta hasta 6% al día.

Por otro lado, se ha concluido que la tecnología biofloc permite que se soporten altas densidades poblacionales en el cultivo de tilapia sin comprometer el rendimiento productivo, la salud ni el bienestar. Se sugiere que 1,000 organismos/m³ en larvicultura de tilapia es la biomasa óptima para maximizar la eficiencia productiva.

En cuanto a la proteína cruda presente en el alimento suministrado, el grueso de los autores coincide en el uso de piensos comerciales con un rango de entre 35 y 45%, suministrado en 2 raciones al día correspondientes al 2% de la biomasa, sin embargo, algunos de ellos ofrecen hasta el 8-10% de la misma.

Los estudios que mencionan los géneros de microorganismos encontrados dentro de los cultivos con tecnología biofloc, difieren mucho entre sí, encontrándose solamente las microalgas *Scenedesmus* sp y los rotíferos *Lecane* sp y *Philodina* sp en más de un artículo.

Es fundamental que en investigaciones posteriores se profundice en las complejas relaciones físicas, químicas y biológicas que ocurren dentro de los sistemas con esta tecnología, así como la identidad de los agentes involucrados en estos procesos. Por otra parte, es indispensable que los estudios en materia de biofloc se realicen a nivel comercial, pues los resultados disponibles actualmente provienen principalmente de diseños experimentales realizados a pequeña escala y en entornos de laboratorio, dificultando el acceso de los productores a esta información. Con base en lo anterior, se vuelve evidente la necesidad de participación interdisciplinaria para el mayor desarrollo y promoción de la tecnología.

De la misma manera, se requiere establecer nuevos canales de comunicación entre el área de investigación y el ámbito productivo para que éste, a través de concientización en el uso de los recursos y capacitación sobre la tecnología, alcance el éxito en el uso de la misma.

Se tiene conocimiento de que la tecnología biofloc es, de entre diversas tecnologías de producción acuícola sostenible (recirculación de agua, humedales construidos y acuaponía), la que requiere el menor porcentaje de recambio de agua y consecuentemente la menor descarga de efluentes, siendo también una de las que emiten menor cantidad de CO₂. Sin embargo, el análisis de las potenciales aplicaciones de la tecnología en otras áreas productivas o biotecnológicas, así como en combinación con otras ecotecnologías, puede ser trascendental para satisfacer las cambiantes necesidades de la humanidad. Por ejemplo, ahondar en la posibilidad del uso conjunto de la tecnología biofloc con la acuaponía o hidroponía para el cultivo de peces y hortalizas, contribuyendo mayormente al abasto de alimentos; así como empleando energía eólica o solar para reducir el uso de energía eléctrica en la aireación que juega un papel fundamental en los sistemas biofloc, dado su uso superior respecto a otras ecotecnologías, reduciendo aún más con esto el impacto ambiental de la producción.

4. Referencias

- Addo, F. G. *et al.* (2021) 'The impacts of straw substrate on biofloc formation, bacterial community and nutrient removal in shrimp ponds', *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, p. 124727. doi: 10.1016/j.biortech.2021.124727.
- de Alvarenga, É. R. *et al.* (2018) 'Moderate salinities enhance growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings in the biofloc system', *Aquaculture Research*, 49(9), pp. 2919–2926. doi: 10.1111/are.13728.
- Avnimelech, Y. (2007) 'Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds', *Aquaculture*, 264(1–4), pp. 140–147. doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.11.025.
- Avnimelech, Y. (2011) 'Tilapia production using biofloc technology', *Global Aquaculture Advocate*, (May/June), pp. 66–68.
- Bañuelos, V. I. *et al.* (2021) 'Antioxidant and immune response of juvenile red tilapia (*Oreochromis* sp) cultured at different densities in sea water with biofloc plus probiotics', *Aquaculture*, 544(June). doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737112.
- Barraza, G. R. H. *et al.* (2013) 'Effluents of Shrimp Farms and Its Influence on the Coastal Ecosystems of Bahía de Kino, Mexico', *The scientific World Journal*, 2013, pp. 1–8.
- Betanzo-Torres, E. A. *et al.* (2019) 'Análisis de la aplicación de la tecnología biofloc en la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en regiones rurales de México', 4, pp. 42–58.
- Betanzo-Torres, E. A. *et al.* (2020) 'Factors that limit the adoption of biofloc technology in aquaculture production in Mexico', *Water (Switzerland)*, 12(10). doi: 10.3390/w12102775.
- Betanzo-Torres, E. A. *et al.* (2021) 'Proposal of ecotechnologies for tilapia (*Oreochromis niloticus*) production in Mexico: Economic, environmental, and social implications', *Sustainability (Switzerland)*, 13(12). doi: 10.3390/su13126853.

Binalshikh-Abubkr, T., Hanafiah, M. M. and Das, S. K. (2021) 'Proximate chemical composition of dried shrimp and tilapia waste bioflocs produced by two drying methods', *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), pp. 1–16. doi: 10.3390/jmse9020193.

Choo, H. X. and Caipang, C. M. A. (2015) 'Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture', *International Journal of the Bioflux Society*, 8(3), pp. 1–277. doi: 10.1079/9780851990149.0000.

Cisneros-Mata, M. A. *et al.* (2019) 'Fisheries governance in the face of climate change: Assessment of policy reform implications for Mexican fisheries', *PLoS ONE*, 14(10), pp. 1–19. doi: 10.1371/journal.pone.0222317.

CMDRS, C. M. para el D. R. S. del G. de M. (2019) *Propuestas de Políticas Públicas para el Desarrollo Rural Sustentable 2019-2024. Grupo Sector Pesca y Acuacultura.*

Collazos, L. L. F. and Arias, C. J. A. (2015) 'Fundamentos de la tecnología biofloc (BFT). Una alternativa para la piscicultura en Colombia . Una revisión Fundamentals of bioflocs technology (BFT). An alternative for fish farming in Colombia . A review . Fundamentos da bioflocos tecnologia (BFT)', pp. 77–86.

CONACYT (2017) *Cultivo integral de tilapia y camarón blanco en Yucatán, Agencia informativa de CONACYT, por: Narváez Marytere.*

CONEVAL (2019) 'Cuadro 1. Medición de la pobreza, Estados Unidos Mexicanos, serie 2008-2018.'

Crab, R. *et al.* (2007) 'Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production', *Aquaculture*, 270(1–4), pp. 1–14. doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.05.006.

Cuéllar, L. M. B. *et al.* (2018) 'Evolución normativa e institucional de la Acuacultura en México.', *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 15(4), pp. 541–564. doi: 10.22231/asyd.v15i4.906.

Day, S. B., Salie, K. and Stander, H. B. (2016) 'A growth comparison among three

commercial tilapia species in a biofloc system', *Aquaculture International*. Springer International Publishing, 24(5), pp. 1309–1322. doi: 10.1007/s10499-016-9986-z.

Van Doan, H. *et al.* (2021) 'Effects of coffee silverskin on growth performance, immune response, and disease resistance of Nile tilapia culture under biofloc system', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 543(May), p. 736995. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736995.

Ebeling, J. M., Timmons, M. B. and Bisogni, J. J. (2006) 'Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 257(1–4), pp. 346–358. doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.03.019.

Emerenciano, M. *et al.* (2013) 'Evaluation of biofloc technology in pink shrimp *Farfantepenaeus duorarum* culture: Growth performance, water quality, microorganisms profile and proximate analysis of biofloc', *Aquaculture International*, 21(6), pp. 1381–1394. doi: 10.1007/s10499-013-9640-y.

Emerenciano, M. *et al.* (2017) 'Biofloc Technology (BFT): A tool for water quality management in aquaculture.', *IntechOpen*.

FAO (2020) *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción., The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA). FAO2020.* Available at: <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.

Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I. (2019) 'Microeukaryote community and the nutritional composition of the biofloc during Nile tilapia culture in water-reusing biofloc systems', *Aquaculture International*. Aquaculture International, 27, pp. 381–398.

García, F. (2017) 'Tecnología biofloc', *Divulgación acuícola*, 40(5), pp. 1–44.

García, G. F. Y. (2021) 'Zootecnia Acuícola', in *Conferencia dirigida por ZIR, expertos en salud: Zootecnia acuícola*.

García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E. (2019) 'Biofloc technology (BFT) applied to tilapia fingerlings production using different carbon sources: Emphasis

on commercial applications', 502(September 2018), pp. 26–31. doi:
10.1016/j.aquaculture.2018.11.057.

Guimarães, L. *et al.* (2021) 'Effects of different stocking densities on Nile tilapia performance and profitability of a biofloc system with a minimum water exchange', *Aquaculture*. Elsevier, 530(August 2020), p. 735814. doi:
10.1016/j.aquaculture.2020.735814.

Haraz, Y., El-Hawarry, W. and Shourbela, R. (2018) 'Culture Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in a biofloc-based intensive system', *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*, 59(1), p. 166. doi: 10.5455/ajvs.299795.

Hargreaves, J. A. (2013) 'Biofloc Production Systems for Aquaculture', *SRAC Publication*, (4503), pp. 1–12. Available at:
<https://pdfs.semanticscholar.org/50cf/d789fdf52ac508531d365e4511cd889eddb3.pdf>.

Haridas, H. *et al.* (2017) 'Enhanced growth and immuno-physiological response of Genetically Improved Farmed Tilapia in indoor biofloc units at different stocking densities', *Aquaculture Research*, 48(8), pp. 4346–4355. doi: 10.1111/are.13256.

INEGI (2019) *Pesca y acuicultura, Cuéntame de México, Economía*.

Jiménez, O. Y. K., Collazos, L. L. F. and Arias, C. J. A. (2018) 'Dynamics and use of nitrogen in biofloc technology - BFT', *AAFL Bioflux*, 11(4), pp. 1107–1129.

Khanjani, M. H., Sharifinia, M. and Hajirezaee, S. (2022) 'Recent progress towards the application of biofloc technology for tilapia farming', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 552(September 2021), p. 738021. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738021.

Lorenzo, J. and Altamirano, M. F. (2019) 'Technological development for the production and commercialization of tilapia (*Oreochromis spp.*)', 12(Figura 1), pp. 101–102.

Martins, G. B. *et al.* (2019) 'Growth, water quality and oxidative stress of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) in biofloc technology system at different pH', *Aquaculture Research*, 50(4), pp. 1030–1039. doi: 10.1111/are.13975.

Martins, M. A. *et al.* (2020) 'Heterotrophic and mature biofloc systems in the integrated culture of Pacific white shrimp and Nile tilapia', *Aquaculture*. Elsevier, 514(August 2019), p. 734517. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734517.

Mirzakhani, N. *et al.* (2019) 'Growth performance, intestinal morphology and nonspecific immunity response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry cultured in biofloc systems with different carbon sources and input C:N ratios', *Aquaculture*. Elsevier, 512(November 2018), p. 734235. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734235.

Monroy, M. del C. *et al.* (2013) 'Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia Microbiology community composition and abundance associated to biofloc in tilapia aquaculture', 48, pp. 511–520. doi: 10.4067/S0718-19572013000300009.

Oceana México (2019) *Auditoría Pesquera, pescando a ciegas. Reporte final auditoría pesquera: México.*

Ogello, E. O. *et al.* (2021) 'The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development', *Scientific African*. Elsevier B.V., 14, p. e01053. doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e01053.

Pérez, R. C. I. (2021) 'Ciclo de conferencias de Organismos Acuáticos en el marco del día Mundial de la Acuicultura', in *Situación actual, perspectivas y desafíos de la acuicultura alternativa.*

Putra, I. *et al.* (2020) 'Effects of Various Carbon Doses on Tilapia (*Oreochromis* sp) Culture with Biofloc Technology', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 430(1), pp. 0–6. doi: 10.1088/1755-1315/430/1/012028.

Ridha, M. T. and Saburova, M. (2020) 'Effects of three carbohydrate sources on water quality , water consumption , bacterial count , growth and muscle quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a biofloc system', *Aquaculture research*, (June), pp. 4225–4237. doi: 10.1111/are.14764.

SAGARPA (2017) *Avanza México como una potencia en producción acuícola.*

Sarsangi Aliabad, H. *et al.* (2022) 'Effects of restricted feeding levels and stocking densities on water quality, growth performance, body composition and mucosal innate immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry in a biofloc system', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 546(November 2020), p. 737320. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737320.

Sgnaulin, T. *et al.* (2020) 'Nutrition of Genetically Improved Farmed Tilapia (GIFT) in biofloc technology system: Optimization of digestible protein and digestible energy levels during nursery phase', *Aquaculture*. Elsevier, 521(September 2019), p. 734998. doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.734998.

Shourbela, R. M. *et al.* (2021) 'The Effect of Stocking Density and Carbon Sources on the Oxidative Status, and Nonspecific Immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) Reared under Biofloc Conditions'.

Venegas, A. A. O. (2019) *Aplicación de la tecnología de biofloc (BFT) al cultivo de Totoaba macdonaldi*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

Villate, S. A. (2017) *La importancia del bucle microbiano en la estructura trófica de lagos someros*.

Widanarni, Ekasari, J. and Maryam, S. I. (2012) 'Evaluation of Biofloc Technology Application on Water Quality and Production Performance of Red Tilapia *Oreochromis* sp. Cultured at Different Stocking Densities', *HAYATI Journal of Biosciences*, 19(2), pp. 73–80. doi: 10.4308/hjb.19.2.73.

Xu, W. *et al.* (2021) 'Production performance , inorganic nitrogen control and bacterial community characteristics in a controlled biofloc-based system for indoor and outdoor super-intensive culture of *Litopenaeus vannamei*', 531(June 2020). doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735749.

Zabidi, A. *et al.* (2021) 'Effects of probiotics on growth, survival, water quality and disease resistance of red hybrid tilapia (*Oreochromis* spp.) fingerlings in a biofloc system', *Animals*, 11(12). doi: 10.3390/ani11123514.

Cuadro 1. Clasificación del sistema biofloc

Autor y año	Cultivo de exterior / Interior	Inóculo de biofloc
Avnimelech, Y., 2007.	Tinas de exterior cubiertas con malla sombra.	No aplicado
Widanarni, Ekasari J., 2012.	Estanques de exterior.	No aplicado
Hargreaves, J. A., 2013	No especificado	No aplicado
Day, S. 2016.	Estudio en invernadero.	No aplica
Haridas, 2017.	No especificado	10 L de agua de estanque con levadura y lodo
Haraz, 2018.	No especificado	No aplicado
Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I., 2019.	Invernaderos cubiertos con malla sombra	No aplicado
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019.	Invernadero	100 ml de inóculo de cultivo de bacterias heterotróficas y fuente de carbono (1 g/100L)
Martins, G. B. et al., 2019.	Experimento en interior	Flóculos microbianos inoculados al inicio del programa al 10% del volumen total
Mirzakhani et al., 2019.	Cultivo de interior	No aplicado
Monroy Dosta, M. del C. et al., 2019.	No especificado	No aplicado
Martins et al., 2020.	Invernadero	No aplicado
Putra et. Al., 2020.	No especificado	Biofloc cultivado con una mezcla de probióticos (<i>Bacillus</i> sp.)
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020.	No especificado	Estanques inoculados con 120 L de agua de biofloc
Sgnaulin et. Al., 2020.	No especificado	Inicio de biofloc con inóculo
Bañuelos et. Al., 2021.	Cultivo al aire libre	Adición de probióticos comerciales Aquablend y Aquaprotec y respectivos suplementos Nutrimax.
Guimarães, L. et al., 2021.	Invernadero	No aplicado
Shourbela, R. M. et al., 2021.	No especificado	No aplicado
Van Doan, 2021.	No especificado	No aplicado
Zabidi, 2021.	Cultivo de interior	Inóculo con agua obtenida de cultivo de tilapia híbrida roja con biofloc maduro (1 mes)
Phan et al., 2022.	No especificado	Adición de probiótico PondPlus (Bayer) con mezcla de <i>Bacillus</i> spp. (<i>B. subtilis</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>B. licheniformis</i> y <i>B. pumilus</i>)
Sarsangi Aliabad et al., 2022.	Invernadero	No aplicado
Cavatti ei al., 2023.	Invernadero	Contenedores llenos con 50% de inóculo de agua de biofloc maduro
Elnady et al., 2023.	Cultivo al aire libre	No aplicado
Solanki et al., 2023.	No especificado	50 L de inóculo/tanque

Cuadro 2. Rendimiento productivo

Autor, año, país y duración del estudio.	Tratamiento	Peso inicial (g)	Peso final (g)	GDP (g/día)	Tasa de CA	Supervivencia (%)	Mejoras en rendimiento
Avnimelech, Y., 2007. Israel. 2 semanas	BFT	107	No especificado	Crecimiento medio diario 1.39% superior que en los estanques control	No especificada	100	Contribución de los flóculos con aproximadamente 50% del requerimiento de PC
Widanarni, Ekasari J., 2012. Indonesia. 14 semanas	BFT 25	75.98 – 78.56	190.86	1.16	No especificada	97.78	Ganancia final: 114.88
	Control 25		215.63	1.39		97.33	137.43
	BFT 50		161.04	0.83		93.56	82.48
	Control 50		216.40	1.36		88.00	135.00
	BFT 100		129.03	0.52		93.00	51.35
	Control 100		165.40	0.92		87.67	91.37
Day, S. 2016. Sudáfrica. 10 semanas	<i>O. andersoni</i>	2,209.34	1,607.19	0.185	2.53	90.25	No aplica
	<i>O. mossambicus</i>	2,191.80	3,044.80	0.405	2.24	87.75	
	<i>O. niloticus</i>	1,157.79	4,923.63	0.693	1.01	98.25	
Haridas, 2017. India. 3 semanas	Control 150	0.98	No especificado	0.10 – 0.15	0.20	100	Potenciación del sistema inmune e indicadores de estrés reducidos en organismos en sistema BFT
	Biofloc 200				0.85	100	
	Biofloc 250				0.93	100	
	Biofloc 300				0.85	100	
	Biofloc 350 *Individuos/m ³				0.81	100	

Rendimiento productivo (*Continuación*)

Autor, año, país y duración del estudio.	Tratamiento	Peso inicial (g)	Peso final (g)	GDP (g/día)	Tasa de CA	Supervivencia (%)	Mejoras en rendimiento
Haraz, 2018. Egipto. 3 semanas	Control	5.74	35.52	0.30	1.13	91.5	No aplica
	Biofloc	5.23	40.25	0.36	0.98	90.5	
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019. México. 25 semanas	Harina de trigo		0.30	0.0014	1.51		No aplica
	Harina de maíz	0.05	0.40	0.002	1.46	57.2 – 60.6	
	Azúcar		0.49	0.0025	1.28		
Martins, G. B. et al., 2019. Brasil. 8 semanas	pH 6.5		40.40	0.61	1.08	84	Rendimiento (kg/m ³): 22.62
	pH 7.5	3.68	44.09	0.67	1.18	80	23.51
	pH 8.3		37.10	0.67	1.06	77.33	19.12
Mirzakhani et al., 2019. Irán. 8 semanas	Relación 1:15	2.2 – 3.1	11.6 – 13.7	0.18	0.96 – 1.40	100	No aplica
	Relación 1:20	2.1 – 2.7	7.8 – 11.4	0.13	1.01 – 1.21		

Rendimiento productivo (Continuación)

Autor, año, país y duración del estudio.	Tratamiento	Peso inicial (g)	Peso final (g)	GDP (g/día)	Tasa de CA	Supervivencia (%)	Mejoras en rendimiento	
Martins et al., 2020. 7 semanas	BFT Maduro	5.73	21.48	0.32	0.20	94.35	No aplica	
	BFT Heterótrofo		45.10	0.80	0.38	99		
Putra et. Al., 2020. Indonesia. 5 semanas	Melaza 50 ml/m ³	1.14	4.66	0.10	X	81.67	X	
	Melaza 100 ml/m ³		5.42	0.12		78.33		
	Melaza 150 ml/m ³		5.46	0.12		80.00		
	Melaza 200 ml/m ³		6.85	0.16		81.67		
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020. Kuwait. 15 semanas	Azúcar	120.6	335.7	2.04	1.79	No especificado	X	
	Harina de trigo		358.5	2.24	1.85			
	Harina de malta		364.2	2.31	1.73			
Sgnaulin et. Al., 2020, Brasil. 6 semanas	22P/3300E	1.0	7.36	6.37	1.16	98.07 – 100	X	
	26P/3150E		7.28	6.2				1.18
	30P/3150E		7.78	6.79				1.11
*P: Proteína digestible. E: Energía digestible								
Bañuelos et. Al., 2021. México. 7 semanas	X	0.98	No especificado	Disminución a alta densidad (240 peces/m ³)	Se observa aumentada a altas densidades	Promedio mínimo de 80	X	
Guimarães, L. et al., 2021. Brasil. 37 semanas	18.75 peces/m ³	139.72	842.26	2.64	2.23	93.54	X	
	37.50 peces/m ³	133.98	738.76	2.33	2.06	95.00		
	56.25 peces/m ³	133.05	672.58	2.08	2.11	94.52		
	75.00 peces/m ³	128.87	539.71	1.59	2.15	87.02		

Cuadro 3. Mantenimiento de la relación C:N

Autor y año	Relación C:N	Fuente de carbono
Avnimelech, Y., 2007.	No especificado	Almidón de trigo pregelatinizado (0.1 – 0.2 mg/L).
Widanarni, Ekasari J., 2012.	15:1	Melaza
Hargreaves, J. A., 2013.	No especificado	No especificado
Day, S. 2016.	No especificado	Harina de maíz
Haridas, 2017.	15:1	Harina de trigo
Haraz, 2018.	15:1	Melaza 53% (2.6 g / día)
Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I., 2019.	12.5:1	Melaza
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019.	12:1	Harina de trigo Harina de maíz Azúcar
Martins, G. B. et al., 2019.	15:1	Melaza líquida de caña de azúcar
Mirzakhani et al., 2019.	15:1	Melaza de remolacha azucarera y harina de trigo en cinco diferentes proporciones (100%, 25% / 75%, 50% / 50% de cada una)
Monroy Dosta, M. del C. et al., 2019.	20:1	
Martins et al., 2020.	15:1	Melaza y pulido de arroz
Putra et. Al., 2020.	8.33:1 (BFT maduro) 14.16:1 (BFT Heterótrofo)	Azúcar de caña
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020.	10:1	Melaza en dosis de 50, 100, 150 y 200 ml/m ³ suministrada semanalmente
Sgnaulin et. Al., 2020.	20:1	Azúcar, harina de trigo o harina de malta con incremento gradual hasta 10 g/día
Bañuelos et. Al., 2021.	15:1	Melaza de caña de azúcar en polvo
Guimarães, L. et al., 2021.	15:1	Harina de maíz con melaza
Guimarães, L. et al., 2021.	6:1	Melaza
Shourbela, R. M. et al., 2021.	15:1	Glicerol, melaza o almidón
Van Doan, 2021.	15:1	Harina de trigo y melaza
Zabidi, 2021.	20:1	Melaza
Phan et al., 2022.	11.5:1	Melaza
Sarsangi Aliabad et al., 2022.	15:1	Melaza
Cavatti et al., 2023.	6:1	Azúcar
Elnady et al., 2023.	No especificado	Maíz molido
Solanki et al., 2023.	20:1	Azúcar morena

C:N: Carbono / Nitrógeno

Cuadro 4.- Parámetros de calidad de agua

Autor, año y país	Tratamiento	T (°C)	pH	OD (mg/L)	SST (mg/L)	NAT (mg/L)	NO₂ (mg/L)	NO₃ (mg/L)
Avnimelech, Y., 2007. Israel.	BFT	26.2	No especificado	8.2	570.4	0.1 – 0.2	No especificado	No especificado
Widanarni, Ekasari J., 2012. Indonesia.	BFT 25 peces/m ³	26.0 – 29.3	6.3 – 7.5	3.26 – 6.89	No especificado	0.01 – 1.13	0.00-2.09	0.00 – 2.92
	BFT 50 peces/m ³					0.14 – 0.75	0.00 – 3.32	0.00 – 2.93
	BFT 100 peces/m ³					0.11 – 1.04	0.00 – 5.85	0.00 – 2.57
Hargreaves, J. A., 2013. EUA.	No aplica	No especificado	7.5	No especificado	300 – 500	No especificado	No especificado	No especificado
Day, S. 2016. Sudáfrica.	BFT	22.5 – 27.5	6.28	6.5	520	3.8	3.51	5.6
Haridas, 2017. India.	BFT	24.51 – 24.89	6.93 – 7.14	5.42 – 5.82	No especificado	0.38 – 0.93	0.36 – 0.46	6.74 – 8.09
Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I., 2019. México.	BFT	26.7	6.8 – 7.55	3.80 – 4.54	0.00 – 0.20	0.03 – 0.02	No especificado	13.22 – 14.49
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019. México.	Harina maíz	25.91 – 25.93	7.78 – 8.64	5.91 – 5.94	No especificado	0.15 – 0.33	5.8	36
	Harina trigo						1.60	46
	Azúcar						2.05	16
Martins, G. B. et al., 2019. Brasil.	pH 8.3	27.5 – 27.7	8.3	5.69	400 - 600	0.94	7.5	123.33
	pH 7.5		7.5	5.91		1.25	7.03	140.00
	pH 6.5		6.5	6.04		1.68	10.10	105.00

Parámetros de calidad de agua (*Continuación*)

Autor, año y país	Tratamiento	T (°C)	pH	OD (mg/L)	SST (mg/L)	NAT (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)
Mirzakhani et al., 2019. Irán.	BFT	27.9 – 29.2	7.6 – 8.0	5.6 – 6.1	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Martins et al., 2020.	BFT	28.2	7.99 – 8.04	5.9 – 6.2	415.3 – 495.0	0.5 – 1.4	1.0 – 1.6	2.9 – 10.8
Putra et al., 2020. Indonesia.	BFT	26 – 26.30	7.00 – 7.60	4.13 – 4.41	No especificado	0.71 – 0.75	No especificado	No especificado
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020. Kuwait.	BFT	29	7.15	7.33	250.7	1.52	1.41	49.51
Sgnaulin et al., 2020. Brasil.	BFT	22.20 – 31.10	6.90 – 8.20	6.15 – 9.16	1.33 - 29	0.13 – 1.23	0.00 – 0.02	0.19 – 0.68
Guimarães, L. et al., 2021. Brasil.	18.75 peces/m ³	26.89	6.87	5.83	436.21	0.27	0.35	168.87
	37.50 peces/m ³	27.07	6.60	5.50	602.39	0.34	0.43	216.33
	56.25 peces/m ³	27.03	6.36	5.31	746.34	0.54	0.54	237.49
	75.00 peces/m ³	27.09	6.35	5.03	754.02	0.62	0.75	254.30
Shourbela, R. M. et al., 2021. Egipto.	BFT	No especificado	7.2	No especificado	No especificado	0.12	0.12	No especificado
Van Doan, 2021. Tailandia.	BFT	27	7.8	4.85	9.15-10.85	0.05- 0.15	No especificado	No especificado

Parámetros de calidad de agua (Continuación)

Autor, año y país	Tratamiento	T (°C)	pH	OD (mg/L)	SST (mg/L)	NAT (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)
Zabidi, 2021. Malasia.	BFT sin probióticos					2.97	1.45	2.20
	BFT probiótico comercial	27.48 – 27.65	6.32 – 6.67	3.24 – 3.53	No especificado	3.20	1.32	2.70
	BFT probiótico mixto					2.60	0.84	2.00
Phan et al., 2022.	Dique HDPE	27.4 – 30.6	7.70 – 8.42	5.09 – 6.24		0.04		
	Fondo HDPE	27.5 – 30.6	7.68 – 8.40	5.10 – 6.28	No especificado	0.04	No especificado	No especificado
	NO HDPE * Material de contenedores	27.4 – 30.5	7.66 – 8.38	5.08 – 6.20		0.00		
Sarsangi Aliabad et al., 2022. Irán.	BFT	28.2 – 28.8	7.80 – 8.08	6.67 – 7.62	Aumento a mayor tasa de alimentación y densidad poblacional	2.35 – 9.83	Aumento a mayor tasa de alimentación y densidad poblacional	Tendencia ascendente gradual
Cavatti et al., 2023. Brasil.	G0 baja densidad	26.19	7.09	6.95	241.50	0.22	0.36	99.64
	G0 alta densidad	26.26	6.90	5.86	338.69	0.67	0.55	184.63
	G5 baja densidad	26.23	7.29	6.95	261.68	0.29	0.55	73.18
	G5 alta densidad * Generación base/5	26.22	6.95	6.03	508.69	0.61	0.52	223.82
Elnady et al., 2023. Egipto.	Control	29.61	8.19	4.86	23.66	0.449	0.696	
	BFT 1.6%	29.86	8.29	5.13	10.58	0.318	0.538	No especificado
	BFT 1.4%	29.95	8.75	6.11	10.66	0.347	0.386	
BFT 1.2% * % biomasa	30.31	8.74	5.92	8.91	0.325	0.284		

Parámetros de calidad de agua (Continuación)

Autor, año y país	Tratamiento	T (°C)	pH	OD (mg/L)	SST (mg/L)	NAT (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)
Solanki et al., 2023. India.	BFT alimento diario	23.71	7.69	6.66	No especificado	0.56	0.31	5.37
	BFT días alternados	23.70	7.72	6.82		0.35	0.28	4.92
	BFT cada tercer día	23.91	7.70	6.23		0.37	0.30	4.47
	BFT sin alimento	23.95	7.76	6.46		0.32	0.22	4.06
	Control	24.40	8.10	6.95		0.24	0.16	0.71

Cuadro 5. Características del cultivo

Autor y año	Áreas de cultivo	Peces	Densidad de siembra	Aireación	Desagüe
Avnimelech, Y., 2007.	Tinas de fibra de vidrio de 1 m ³ , llenas a 800 L	Tilapias mozámbricas	20 peces de 107 g / tina	Aireadores de paleta (13 HP) creando corriente circular, piedras difusoras y mezcla manual 2 veces/día.	Drenaje central
Widanarni, Ekasari J., 2012.	12 estanques de concreto de 6 m ³ , llenas a 3000 L	Tilapias rojas de sexos mixtos	25, 50 y 100 individuos/m ³ según tratamiento	Aireación con sopladores de aire 16 líneas (5 L/min/línea) por tanque durante las primeras 7 semanas, 24 líneas/tanque posteriormente.	Sin drenaje
Hargreaves, J. A., 2013.	Estanque de cría: 16 m diámetro/volumen 200 m ³ hecho de bloques de dintel reforzado y revestimiento plástico	Tilapias	20 – 25 peces / m ³	3 aireadores de bomba vertical (3/4 HP) y 1 más orientado horizontalmente (flujo rotacional)	Drenaje central con 3% de inclinación hacia el mismo
Day, S. 2016.	4 contenedores de 62 cm de diámetro por especie (<i>O. niloticus</i> , <i>O. mossambicus</i> y <i>O. andersonii</i>) con volumen de 250 L	Tilapia del Nilo, tilapia mozámbrica y tilapia manchada, sexos mixtos	60 individuos / contenedor	Aireación con soplador de canal lateral funcionando continuamente.	Drenaje central
Haridas, 2017.	Tinas de plástico reforzado con fibra de vidrio de 110 L de capacidad	2000 tilapias cepa GIFT	200, 250, 300 y 350 individuos/m ³ de acuerdo con tratamiento	No especificado	No especificado
Haraz, 2018.	8 estanques circulares de fibra de vidrio de 500 L de capacidad, llenos a 300 L	Juveniles de tilapia sanos	300 peces/m ³	Aireación con soplador de aire (1.5 HP), mangueras de goma porosa y piedras de aire	No especificado

Características del cultivo (*continuación*)

Autor y año	Áreas de cultivo	Peces	Densidad de siembra	Aireación	Desagüe
Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I., 2019.	Estanque de cultivo principal de 3 m ³ y tres unidades experimentales de 0.2 m ³	Tilapia del Nilo	100 tilapia/m ³	Aireación constante (piedras de aire 3HP)	No especificado
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019.	12 estanques de fibra de vidrio de 100 L	Alevines de tilapia del Nilo revertidos sexualmente	3 peces/L	Aireación con piedra de aire conectada a soplador (1/3 HP)	No especificado
Martins, G. B. et al., 2019.	Unidades experimentales con volumen de 37.5 L	Juveniles de tilapia del Nilo	25 peces / unidad experimental	Dos piedras de aire en el fondo	No especificado
Mirzakhani et al., 2019.	33 tinas cilíndricas de polietileno con capacidad de 15 L, llenos a 10 L	330 alevines de tilapia del Nilo	10 organismos/unidad experimental	Aireación continua con piedra de aire conectada a compresor de aire central	No especificado
Monroy Dosta, M. del C. et al., 2019.	Estanque de fibra de vidrio circular de 1000 L y 5 tinas circulares de 250 L c/u	75 tilapias en contenedor de 1000 L	3.17 g/L	Difusor de aire en el centro, unidades conectadas con sistema de recirculación por dos bombas (1 HP)	No especificado
Martins et al., 2020.	31 acuarios de 90 L	Juveniles de <i>O. Niloticus</i> (linaje GIFT)	344 peces/m ³	4 difusores de aire/tanque, conectados a un soplador	No especificado
Putra et. Al., 2020.	12 contenedores con capacidad de 100 L, llenos a 80 L	Tilapias rojas (<i>Oreochromis</i> sp.)	250 individuos/m ³ (20 peces/contenedor)	Aireación continua	No especificado
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020.	12 contenedores de fibra de vidrio con capacidad de 1.2 m ³ , volumen de agua de 1 m ³	Tilapias del Nilo de sexos mixtos con media de peso de 120.6 g	25 peces /contenedor	Aireación constante y vigorosa	No especificado

Características del cultivo (*Continuación*)

Autor y año	Áreas de cultivo	Peces	Densidad de siembra	Aireación	Desagüe
Sgnaulin et. Al., 2020.	36 unidades experimentales circulares con capacidad de 100 L, llenos a 70 L	486 tilapias genéticamente mejoradas (GIFT) en etapa de crianza	13 peces/unidad experimental	Compresor de aire radial (2 HP) y piedra porosa	No especificado
Bañuelos et. Al., 2021.	18 contenedores con 350 L	Juveniles de tilapia roja <i>Oreochromis</i> sp. híbrida	120 y 240 peces/m ³	Aireación continua con soplador de 2.5 HP.	No especificado
Guimarães, L. et al., 2021.	16 contenedores de polipropileno de 1000 L, llenos a 800 L /tratamiento	600 juveniles de tilapia del Nilo	19, 37, 56 o 75 peces/m ³ de acuerdo con el tratamiento	Ventiladores de canal lateral y difusores de aire	No especificado
Shourbela, R. M. et al., 2021.	24 contenedores de plástico (500L)	Tilapia del Nilo	Tratamientos de baja (140 peces/m ³) y alta densidad (280 peces/m ³)	Ventilador de canal lateral 1.5 kW. Mangueras de goma porosa y cuatro piedras de aire	No especificado
Van Doan, 2021.	15 contenedores de 150 L	300 alevines de tilapia del Nilo	20 peces/acuario	No especificado	No especificado
Zabidi, 2021.	12 acuarios con capacidad de 6 L llenos a 5 L	Alevines de tilapia híbrida roja (<i>Oreochromis</i> spp.)	20 alevines/acuario (4 alevines/L)	Aireación continua con sopladores de aire	No especificado
Sarsangi Aliabad et al., 2022.	36 unidades experimentales de polietileno con 40 L de capacidad, llenos a 26 L	Juveniles de tilapia del Nilo	500 o 1000 peces/m ³ de acuerdo con tratamiento	Aireación continua con piedra de aire sumergida, conectada a ventilador central	No especificado
Cavatti et al., 2023.	16 unidades experimentales de polipropileno con capacidad de 1000 L y volumen útil de 800 L	320 alevines de tilapia del Nilo masculinizados	37.5 o 12.5 individuos/m ³ de acuerdo con el tratamiento	Aireación con sopladores radiales y estructuras difusoras	No especificado

Características del cultivo (*Continuación*)

Autor y año	Áreas de cultivo	Peces	Densidad de siembra	Aireación	Desagüe
Elnady et al., 2023.	8 estanques rectangulares de concreto con capacidad de 2.64 m ³ , llenos a 2.0 m ³	256 juveniles de tilapia del Nilo	32 individuos/estanque	Aireación continua 24h/día con soplador	No especificado
Solanki et al., 2023.	15 contenedores circulares de plástico reforzado con fibra, capacidad de 500 L llenos a 300 L	600 alevines de tilapia cepa GIFT	40 peces/contenedor	Aireación continua con piedra difusora y uso de regulador para controlar la presión del aire	No especificado

BFT: Biofloc; T: Temperatura; OD: Oxígeno disuelto; SST: Sólidos suspendidos totales; NAT: Nitrógeno amoniacal total; NO²: Nitritos; NO³: Nitratos.

Cuadro 3. Manejos

Autor y año	Recambios de agua / remoción de lodos	Suministro de alimento	Adición de compuestos químicos / biológicos	Ajustes de biomasa
Avnimelech, Y., 2007.	6%/día Remoción diaria de lodos	Alimento balanceado (20% de PC) en raciones del 2% de la biomasa, 3 veces/día	Nitrógeno en forma de amoníaco marcado (0.5 mg/L)	No especificado
Widanarni, Ekasari J., 2012.	Reposición por evaporación Remoción de alimento no consumido	Alimento comercial (32% PC) hasta aparente saciedad, 3 veces/día	No aplica	No especificado
Hargreaves, J. A., 2013.	0.2 – 0.4%/día.	175 – 200 g / m ³ de alimento comercial / día.	1-2 kg cal viva/día	No especificado
Day, S. 2016.	Remoción semanal de lodos	Alimento comercial (35% PC) 2 veces/día a una tasa de alimentación de 1.5% de biomasa	No aplica	Ajustes para mantenimiento de calidad del agua
Haridas, 2017.	No especificado	Dieta comercial (35% PC)	No aplica	No especificado
Haraz, 2018.	Reposición por evaporación	Alimento (30% PC) suministrado en raciones de 2% de biomasa	No aplica	Ajustes quincenales
Gallardo-Collí, A. and Pérez-Rostro, C. I., 2019.	Reposición por evaporación y por eliminación de lodos	Alimento balanceado (32% PC) al 2% de biomasa, 2 veces/día	Fertilizante líquido, hidróxido de Ca y Cal hidratada	Ajustes posteriores a cada biometría
García, L. R., Miranda, A. B. and Coelho, M. G. E., 2019.	10% de reposición diaria por evaporación	Alimentación 50% de ración diaria correspondiente de pienso granulado (35% PC)	No aplica	No especificado
Martins, G. B. et al., 2019.	Clarificación de agua dependiente del pH manejado en cada estanque	Alimento comercial (40, 42 y 45% PC de acuerdo con el tratamiento) 4 veces/día	Alcalinizante: NaHCO ₃ , correcciones diarias después de alimentación, calculadas con base en valores de pH (5-100 mg/L)	Ajustes semanales

Manejos (Continuación)

Autor y año	Recambios de agua / remoción de lodos	Suministro de alimento	Adición de compuestos químicos / biológicos	Ajustes de biomasa
Mirzakhani et al., 2019.	Reposición por evaporación	Alimento comercial (40% PC) a razón de 2,5% de biomasa/día en tres raciones	No aplica	No especificado
Monroy Dosta, M. del C. et al., 2019.	No especificado	Alimento comercial (45% PC) al 10% de biomasa	No aplica	Ajustes quincenales
Martins et al., 2020.	Reposición por evaporación y drenaje de lodos	Alimento comercial (45% PC) a razón de 1% de la biomasa	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂) diario a razón de 25% de las entradas de alimento (si la alcalinidad <150 mg/L) y cal hidratada	Ajuste al día 30
Putra et. Al., 2020.	No especificado	Alimento comercial (38% PC), 3 veces/día	No aplica	No especificado
Ridha, M. T. and Saburova, M., 2020.	Reposición por lavados y evaporación	Alimento comercial (32% PC) al 2 % de biomasa total	No aplica	No especificado
Sgnaulin et. Al., 2020.	No especificado	Alimento comercial 3 veces/día, a razón de 8% de biomasa	No aplica	Ajustes semanales de acuerdo con biometrías
Bañuelos et. Al., 2021.	5% semanal y reposición de pérdidas por evaporación	Alimento comercial (40% PC) 3 veces/día	No aplica	No especificado
Guimarães, L. et al., 2021.	5%/día	Alimento comercial (32% PC) 3 veces/día hasta la aparente saciedad	Cal hidratada para mantenimiento de pH (con pH inferior a 6.5)	No especificado
Shourbela, R. M. et al., 2021.	10% reposición diaria por evaporación	Suministro de alimento (30% PC) 2 veces/día	No aplica	No especificado
Van Doan, 2021.	No especificado	Alimento comercial (31% PC) hasta saciedad aparente, suministradas en 2 raciones/día	Adición de dolomita para mantenimiento de pH	No especificado
Zabidi, 2021.	Reposición por evaporación	Alimento comercial (44% PC) 2 veces/día	No aplica	No especificado

Manejos (Continuación)

Autor y año	Recambios de agua / remoción de lodos	Suministro de alimento	Adición de compuestos químicos / biológicos	Ajustes de biomasa
Phan et al., 2022.	Reposición por evaporación	Alimento comercial (30 – 35% PC de acuerdo con el crecimiento de los peces), al 2 – 5% de biomasa, 2 veces/día	No aplica	Quincenales
Sarsangi Aliabad et al., 2022.	2 – 5%/día	Alimento comercial (39% PC), 3 veces/día	No aplica	Ajustes semanales
Cavatti et al., 2023.	Recambio del 17.5% semanal	Alimento comercial (32% PC), 3 veces/día	200 g /tanque de piedra caliza (CaCO ³) al alcanzar alcalinidad menor a 75 mg/L	Mensuales
Elnady et al., 2023.	Recambio total mensual	Alimento comercial (31.1% PC) al 2, 1.6, 1.4 o 1.2 % de biomasa, 6 días/semana	No aplica	Mantenimiento durante el estudio en % de acuerdo con tratamiento
Solanki et al., 2023.	Sin recambios de agua ni eliminación de lodos	Alimento comercial (32% PC) al 4% de biomasa 2 veces/día	No aplica	No especificado

PC: Proteína cruda.

Cuadro 7. Microorganismos identificados en el sistema BFT

Autor	Bacterias	Protozoarios (Ciliados, flagelados, amebas)	Hongos y levaduras	Microalgas	Nemátodos y anélidos	Zooplankton (Cladóceros, copépodos, flagelados, rotíferos)
Widanarni, Ekasari J., 2012.	No especificado	No especificado	No especificado	Diatomeas <i>Fragilaria</i> sp. Clorofitas <i>Scenedesmus</i> sp.	No especificado	Amebas: <i>Arcella</i> <i>Centropbyxis</i> <i>Difflugia</i> <i>Euglypha</i>
Gallardo Collí, 2019.	No especificado	Ciliados: <i>Acineta</i> <i>Aspidisca</i> <i>Astylozoon</i> <i>Coleps</i> <i>Cyclidium</i> <i>Didinio</i> <i>Epistylis</i> <i>Euplotes</i> <i>Frontonia</i> <i>Litonotus</i> <i>Monodinio</i> <i>Paramecio</i> <i>Phialina</i> <i>Podofrya</i> <i>Sphaerophrya</i> <i>Estrombidio</i> <i>Thigmogaster</i> <i>Tokophrya</i> <i>Urotricha</i> <i>Vorticella</i> Flagelados: <i>Codosiga</i> <i>Entosiphon</i> <i>Euglena</i> <i>Petalomonas</i>	No especificado	<i>Achnanthes</i> <i>Actinastrum</i> <i>Ankistrodesmus</i> <i>Aulacoseira</i> <i>Clamidia</i> <i>Clorella</i> <i>Chroococcus</i> <i>Coelastro</i> <i>Crucigenia</i> <i>Cymbella</i> <i>Dictyosphaerium</i> <i>Geitlerinema</i> <i>Gloeobacter</i> <i>Gloeocaspa</i> <i>Gloeocystis</i> <i>Leptolyngbya</i> <i>Microspora</i> <i>Monoraphidium</i> <i>Neochloris</i> <i>Nitzschia</i> <i>Oocystis</i> <i>Pediastro</i> <i>Planktolyngbya</i> <i>Rhoicosphenia</i> <i>Scenedesmus</i> <i>Snowella</i>	Nemátodos: <i>Diplogaster</i> <i>Diploscapter</i> <i>Plectus</i> <i>Rabditis</i> Anélidos: <i>Aeolosoma</i>	Rotíferos: <i>Adineta</i> <i>Brachionus</i> Lecane <i>Lepadella</i> Philodina

**Protozoarios
(Continuación)**

Amebas:

Actinoprys

Arcella

Centropyxis

Criptodiflugia

Diflugia

Euglypha

Hartmannella

Hialosfenia

Mayorella

Thecamoeba

Trinema

Vannella

Sphaerocystis

Microalgas

(Continuación)

Espirulina

Synedra

Tetraedro

Tribonema

Ulothrix

Westella

Microorganismos reportados en el sistema BFT (*Continuación*)

Autor	Bacterias	Protozoarios (Ciliados, flagelados, amebas)	Hongos y levaduras	Microalgas	Nemátodos y anélidos	Zooplankton (Cladóceros, copépodos, flagelados, rotíferos)
Martins et al., 2020.	Filos y familias, género no especificado. Proteobacteria: Rhodobacteraceae, Vibrionaceae y Cellvibrionaceae. Bacteroidetes: Cyclobacteriaceae y Saprosiraceae Patescibacteria Actinobacteria Chloroflexi	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado

Microorganismos reportados en el sistema BFT (Continuación)

Autor	Bacterias	Protozoarios (Ciliados, flagelados, amebas)	Hongos y levaduras	Microalgas	Nemátodos y anélidos	Zooplankton (Cladóceros, copépodos, flagelados, rotíferos)
Monroy Dosta, 2019.	<i>Aeromonas</i> <i>Vibrio</i> <i>Enterobacter</i> <i>Nitrospira</i> <i>Bacillus</i> <i>Sphingomonas</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Microthrix</i> <i>Nitrobacter</i> <i>Micrococcus</i> <i>Alcaligenes</i>	Ciliados: <i>Paramecium</i> <i>Colpidium</i> <i>Stylonychia</i> <i>Vorticella</i> <i>Epystillis</i> <i>Halteria</i>	<i>Rhodotorula</i>	Clorofitas Diatomeas Cianobacterias	No especificado	Rotíferos: <i>Philodina</i> <i>Lecane</i> <i>Keratella</i>
Ridha, 2020.	No especificado	Protozoarios: Centrohélidos Amebas	No especificado	Clorofitas Cianobacterias	Anélidos: Oligoquetos Nemátodos	Rotíferos Crustáceos
Cavatti et al., 2023.	<i>Escherichia coli</i> <i>Staphylococcus</i> spp.	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado