

Perifiton y sus aplicaciones en la acuicultura

Periphyton and its applications in aquaculture

Perifíton e suas aplicações na aquicultura

Julian C. Barreto-Montenegro¹ 

Luis F. Collazos-Lasso² 

Artículo de investigación

Recibido: 01 de abril de 2023

Aceptado: 03 de julio de 2023

Publicado: 14 de julio de 2023

RESUMEN

El perifiton es una comunidad de microorganismos que cumple con una importante función en los ecosistemas acuáticos relacionada con el ciclo de nutrientes y producción primaria, características empleadas para el tratamiento de aguas residuales, siendo aprovechada la biomasa producida como biofertilizante o biocombustible. En el presente artículo se realiza una revisión bibliográfica de las aplicaciones que ha tenido esta comunidad de microorganismos en la acuicultura. Las primeras investigaciones en este campo se relacionan con la inclusión de sustratos en tanques de producción acuícola de camarones y peces, donde la comunidad, mediante adición y/o captación de nutrientes generados, produce bioamasa que se usa como alimento. La introducción de sustratos en sistemas biofloc es un campo que se ha investigado en los últimos años, el cual reporta resultados prometedores en la producción de camarones, pero que requiere mayor investigación, especialmente en la producción piscícola. Tecnologías basadas en biofiltros perifíticos han demostrado porcentajes de retención cercanas al 100% de compuestos nitrogenados, donde la biomasa producida también es usada como alimento para las diferentes especies de cultivo. El perifiton también constituye una herramienta en el monitoreo de los efectos que tiene la industria sobre los ecosistemas acuáticos naturales. Por último, las ómicas son una herra-

1 Biól. Grupo de investigación IALL, Instituto de Acuicultura de los Llanos - IALL, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta - Colombia, Email: julian.barreto@unillanos.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-8084-3144>

2 Ing. en Prod Acuicol, MSc, PhD. Grupo de investigación IALL, Instituto de Acuicultura de los Llanos - IALL, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta - Colombia, Email: lcollazos@unillanos.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6034-0037>

Como Citar (Norma Vancouver): Norma Vancouver): Barreto-Montenegro JC, Collazos-Lasso LF. Perifiton y sus aplicaciones en la acuicultura. *Orinoquia*, 2023;27(1):e-793 <https://doi.org/10.22579/20112629.793>

La Revista Orinoquia es una revista de acceso abierto revisada por pares. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

OPEN ACCESS



mienta que permitiría explorar las complejas relaciones entre las comunidades microbianas y sus efectos sobre los animales cultivados y la calidad de agua, que aún ha sido poco explorada.

Palabras clave: biofilm, sustrato, comunidad microbiana, calidad de agua, producción acuícola.

ABSTRACT

Periphyton is a community of microorganisms that plays an important role in aquatic ecosystems related to nutrient cycling and primary production, characteristics used for wastewater treatment, and using the biomass produced as a biofertilizer or biofuel. In this article, a bibliographic review of the applications of this community of microorganisms in aquaculture was conducted. The first investigations in this field were related to the inclusion of substrates in shrimp and fish aquaculture production tanks, where the community, by adding and/or uptake of generated nutrients, produces biomass that is used as food. The introduction of substrates in biofloc systems is a field that has been investigated in recent years, which reports promising results in shrimp production, but requires further investigation, especially in fish production. Technologies based on periphytic biofilters have shown retention percentages close to 100% of nitrogenous compounds, and the produced biomass can be used as food for different crop species. Periphyton also constitutes a tool for monitoring the effects of the industry on natural aquatic ecosystems. Finally, omics are a tool that would allow exploring the complex relationships between microbial communities and their effects on farmed animals and water quality, which has still been little explored.

Key words: Biofilm, substrate, microbial community, water quality, aquaculture production.

RESUMO

O perifíton é uma comunidade de microrganismos que desempenha importante papel nos ecossistemas aquáticos relacionados à ciclagem de nutrientes e produção primária, características utilizadas para o tratamento de águas residuárias, utilizando a biomassa produzida como biofertilizante ou biocombustível. Neste artigo, foi realizada uma revisão bibliográfica das aplicações que esta comunidade de microrganismos tem tido na aquicultura. As primeiras investigações neste campo foram relacionadas à inclusão de substratos em tanques de produção de camarão e piscicultura, onde a comunidade, ao adicionar e/ou absorver os nutrientes gerados, produz biomassa que é utilizada como alimento. A introdução de substratos em sistemas de biofloc é um campo que vem sendo investigado nos últimos anos, que relata resultados promissores na produção de camarão, mas que carece de maiores investigações, principalmente na produção de peixes. Tecnologias baseadas em biofiltros perifíticos têm apresentado percentuais de retenção próximos a 100%

de compostos nitrogenados, onde a biomassa produzida também pode ser utilizada como alimento para diferentes espécies de cultivo. O perifiton também constitui uma ferramenta no monitoramento dos efeitos que a indústria tem sobre os ecossistemas aquáticos naturais. Finalmente, as ômicas são uma ferramenta que permitiria explorar as complexas relações entre as comunidades microbianas e seus efeitos sobre os animais de produção e a qualidade da água, ainda pouco exploradas.

Palavra chave: Biofilm, substrato, comunidade microbiana, aualidade da água, produção aquícola.

INTRODUCCIÓN

El perifiton es una comunidad de microorganismos (bacterias, hongos, algas, protozoarios y microfauna) adheridos a un sustrato (superficie) sumergido, orgánico o inorgánico, vivo o muerto, en el cual hay un intrincado intercambio de materia y energía, que juegan un papel importante en la regulación de nutrientes y producción primaria en los ecosistemas acuáticos (Wetzel, 1983). El ensamblaje y composición de esta comunidad puede responder de manera rápida a cambios en las condiciones físicas y químicas en su entorno, presentando en algunos casos una gran adaptabilidad (Montuelle *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2017).

En algunos artículos, esta comunidad es referida como un biofilm (Ferreira *et al.*, 2016) o biofilm perifítico (Khatoon *et al.*, 2007a). Un biofilm es una comunidad de microorganismos unidos a cualquier tipo de sustrato por medio de una matriz extracelular; por lo tanto, el perifiton puede considerarse un biofilm, con la condición de que esté adherido a una superficie sumergida en el agua; además, en el perifiton también pueden desarrollarse organismos macroscópicos (Gubelit y Grossart, 2020).

Estas comunidades de microorganismos han sido empleadas en campos asociados a la biorremediación de aguas (Salvi *et al.*, 2021)the present work proposes modifications to the Algal Turf Scrubber (ATS, producción de biofertilizantes (Han *et al.*, 2020), biocombustibles (Adey *et al.*, 2013), alimentos (Savonitto *et al.*, 2021) y en el monitoreo de la calidad del agua (Barbour *et al.*, 1999). Dichos campos han sido llevados a la industria aquícola, respondiendo a necesidades relacionadas con el

uso eficiente del agua, el manejo de los residuos derivados de la producción y una mayor productividad (FAO, 2020).

La acuicultura basada en perifiton (PBA, por sus siglas en inglés *Periphyton-Based Aquaculture*) surge como una alternativa al manejo de la calidad de agua y producción de alimento. La PBA consiste en la utilización de sustratos para favorecer la formación de organismos microbianos donde la biomasa se desarrolla a partir de los nutrientes derivados de la actividad aquícola, mejorando la calidad de agua, al mismo tiempo que produce alimento natural (Ruby *et al.*, 2018). Generalmente la PBA se asocia a la introducción de sustratos en los estanques productivos, sin embargo, se han desarrollado biofiltros que se pueden integrar a sistemas de recirculación, donde el perifiton puede ser cosechado.

El presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión general de las aplicaciones que tiene el perifiton en la acuicultura.

AGUICULTURA BASADA EN PERIFITON (PBA)

La introducción de sustratos en el agua como ramas, macrofitas o paja para atraer peces, por la protección y/o alimento (cuya base es el perifiton) que estas estructuras ofrecen, es una práctica de pesca y cultivo tradicional empleada en África occidental y Asia (Ruby *et al.*, 2018). Métodos de pesca y producción tradicionales basados en estos principios se conocen como *Acadja* en África occidental, *Athkotu* en Sri Lanka, *Katha* en Bangladesh, *Samarahs* en Camboya y *Phum* y *Aji gnui assonii* en la India (Saikia y Das, 2009).

La PBA se basa en la adición de sustratos en los sistemas de producción que brindan una superficie que permiten el desarrollo de perifiton (Abwao *et al.*, 2014). Su adición brinda refugio a los organismos cultivados, disminuye efectos territoriales y el perifiton que se desarrolla constituye una fuente de alimento natural, al mismo tiempo que disminuye la carga de nutrientes (Li *et al.*, 2017; Ruby *et al.*, 2018). El perifiton desarrollado en los sustratos se incorpora en la cadena trófica y favorece la productividad de los estanques. Umesh *et al.* (1999) identificaron un aumento del 50% en el crecimiento de la carpa común (*Cyprinus carpio*), rohu (*Labeo rohita*) y tilapia Mozambique (*Oreochromis mossambicus*) al agregar bagazo de caña de azúcar en la columna de agua. Este aumento se asoció al desarrollo de un biofilm en el sustrato, lo cual promovió un mayor desarrollo de zooplankton y una reducción en los niveles de amoníaco.

Los sistemas basados en perifiton también pueden mejorar la actividad enzimática (Barlaya *et al.*, 2021) y disminuir la carga de patógenos (da Silva *et al.*, 2016).

Esta tecnología ha sido una alternativa para el desarrollo de la acuicultura en países con bajos recursos, donde los costos de los alimentos y el desarrollo de granjas altamente tecnificadas son limitantes (Abwao *et al.*, 2014).

Entre los sustratos empleados se encuentran ramas o troncos de árboles, bambú, láminas de plástico, tubos de policloruro de vinilo (PVC) y cerámicas, entre otros (Ruby *et al.*, 2018). La elección de uno u otro puede afectar en la composición de la comunidad, calidad nutricional y productividad del biofilm (Azim *et al.*, 2002) the effects of artificial substrates on development of periphyton and on water quality were evaluated. Earthen ponds (10 × 7.5 m. Otros factores como la luz (profundidad), concentraciones de nutrientes, proporción entre carbono (C) y nitrógeno (N) (relación C:N) y salinidad en el agua (Khattoon *et al.*, 2010), entre otros, pueden alterar la composición taxonómica y química de la comunidad (Tabla 1).

Los sustratos se suelen agregar en relación con el área superficial o lateral de los estanques, generalmente proporcionando un porcentaje de área adicional mayor al 60% y fácilmente superando el 100% (Tabla 2).

Zhang *et al.* (2013) han identificado que la consistencia del sustrato, duro o blando, influye de manera diferencial en la jerarquía de factores que afecta la comunidad en ecosistemas hipereutróficos. Al usar diferentes tipos de sustratos duros, la concentración de nutrientes tiene un papel preponderante sobre estos en la composición del perifiton, mientras que, en diferentes sustratos blandos, el tipo de sustrato junto con la relación C: nutrientes, tiene mayor influencia que la concentración de nutrientes. Por otra parte, Trbojević *et al.* (2018) han encontrado que por debajo de la zona fótica (50 cm), la profundidad empieza a influenciar más en la relación tipo de sustrato (artificiales) versus composición del perifiton.

La implementación de sistemas basados en perifiton con elevadas relaciones de C:N es viable, proporcionando en estos alimento natural proveniente de bacterias heterótrofas y algas perifíticas (Anand *et al.*, 2013). Los sistemas de producción acuícola basados en perifiton con relaciones de C:N controladas han sido llamados C:N-CP (por sus siglas en inglés *C/N controlled periphyton-based*) por algunos autores (Haque *et al.*, 2015). En estos sistemas puede haber resuspensión de sólidos provocada por la acción del desplazamiento de los peces en los estanques (Asaduzzaman *et al.*, 2009, 2010).

El aumento de la relación C:N estimula un mayor desarrollo de bacterias heterótrofas (Asaduzzaman *et al.*, 2008), que puede favorecer la producción de bacterias con potencial probiótico tipo *Verrucomicrobiae* y *Rhodobacter* (Yu *et al.*, 2016). Anand *et al.* (2013) evaluaron el efecto de la relación C:N (C:N= 10 y C:N= 20) en la comunidad perifítica desarrollada en sustratos de bambú en un cultivo de *Penaeus monodon*, donde identificaron un mayor índice autotrófico, concentración de clorofila a, materia seca y materia seca libre de

cenizas por unidad de área en la relación C:N 20. Además, evidenciaron una mayor carga heterotrófica en el tratamiento C:N 20 (106%) respecto al C:N 10. La relación C:N de 20 produjo una mayor eliminación de TAN, NO₃⁻ y NO₂⁻, mejoró el índice de conversión alimenticia, crecimiento y supervivencia de los juveniles. Para el camarón *Macrobrachium rosenbergii*, se ha encontrado que relaciones C:N de 20 puede favorecer de un 66% al 102% la producción del camarón respecto a cultivos tradicionales y con relación C:N 20 sin sustrato (Haque et al., 2015).

La proporción de bacterias probióticas presentes en el perifiton también puede verse alterada por este factor. Yu et al. (2016) identificaron un aumento en la proporción de *Verrucomicrobiae* y *Rhodobacter* en respuesta al manejo de la relación C:N. Esta proporción fue más elevada en la relación C:N 20 en comparación con CN10, C:N 15 y C:N 25, lo cual influyó en una mayor producción de carpa herbívora.

Diferentes modelos han sido propuestos para explicar la dinámica físicoquímica de la calidad de agua en sistemas PBA. Estos fueron realizados bajo macroproyectos desarrollados en Bangladesh empleando modelos multivariados, los cuales pueden ser consultados en los trabajos de Azimet et al. (2003); Milsteina et al. (2003) y Sharif-Uddin et al. (2008) *Oreochromis niloticus* (L.). En estos trabajos las algas presentes en el fitoplancton y el perifiton, producen materia orgánica y O₂ captando CO₂, nutrientes y usando energía solar. Estas pueden ser fuente de alimento directa (pastoreo, filtración, etc.) o indirecta para los peces, al integrarse a la red trófica sirviendo de alimento a consumidores secundarios (zooplancton, macroinvertebrados, etc.) que tendrán el potencial de ser consumidos por los peces o camarones (Ruby et al., 2018). Tanto las bacterias heterótrofas como las algas del biofilm pueden captar el nitrógeno amoniacal y nitritos producidos por la excreción de los animales cultivados y la descomposición del fondo del tanque o del sedimento (Santhana Kumar et

al., 2017). En las algas el NO₃⁻ es reducido a NO₂⁻ y posteriormente a NH₄⁺ por la nitrato reductasa, cuya expresión es suprimida bajo altas concentraciones de NH₄⁺, a partir del cual se sintetizan aminoácidos (Wu, 2017). Los sustratos también brindan superficie adicional con disponibilidad de oxígeno (en las zonas superiores) para favorecer la actividad de bacterias nitrificantes (Asaduzzaman et al., 2008).

Composición y efectos nutricionales del perifiton en la PBA

El perifiton podría tener un aporte nutricional superior al del plancton (Gangadhar et al., 2018) y su biomasa se encuentra más concentrada, lo cual lo hace un alimento más accesible y eficiente para especies de peces y camarones que pastorean (Neori et al., 2017). El término pastorear hace referencia al consumo de fitoplancton, perifiton o macrófitas por parte de organismos filtradores, raspadores y/o fragmentadores (Rivera-Usme et al., 2013). La suplementación con perifiton puede aumentar el contenido de proteína y lípidos, así como la actividad metabólica e inmunitaria en camarones (Khatoon et al., 2007b; Shyne-Anand et al., 2015) y peces (Gangadhar et al., 2018; Shilta et al., 2016). Umalatha et al. (2017) determinaron altas digestibilidades proteicas (92.29%) en *Labeo fimbriatus* alimentado con perifiton (92.29%) y una mayor actividad de proteasas totales y carboxilasa B respecto a peces alimentados con alimento granulado.

La composición proximal del perifiton (ver Tabla 1) es variable y junto con la biomasa producida, pueden verse afectados por factores como: el tipo de sustrato, la profundidad, el tiempo de colonización y exposición al cultivo, la concentración de nutrientes, la relación C:N, la salinidad (Khatoon et al., 2010), el pastoreo, la cantidad o proporción de sustrato empleado, la densidad de cultivo, entre otros.

Los sustratos de caña de bambú son ampliamente usados y pueden producir un elevado contenido de proteína, de hasta 38.3% en base seca (Azim et

al., 2002). La profundidad influye en la microbiota fotoautótrofa. Garg y Bhatnagar (2016) observaron una mayor productividad a profundidades de 50 cm, lo cual coincidió con la zona de compensación fotosintética; Garg et al. (2008) encontraron resultados similares. Gangadhar et al. (2017) evaluaron los efectos de la cachaza, (producto derivado de la fermentación de la caña de azúcar), el estiércol de ganado y la gallinaza como fertilizantes en la producción de perifiton y plancton, encontrando que la gallinaza producía mayor biomasa perifítica, cantidad de pigmentos y proteína cruda.

La salinidad puede afectar de manera diferencial la composición proximal en diferentes tipos de algas perifíticas marinas. Khatoon et al. (2010) identificaron que diatomeas como *Amphora* sp., *Cymbella* sp. y *Navicula* sp., tenían un mayor desarrollo a salinidades de 35 g/l pero que el mayor contenido de proteína y lípidos se daba a bajas salinidades (15-25 g/l), mientras que la cianobacteria *Oscillatoria* sp. obtuvo un mayor desarrollo en salinidades de 25 g/l, aunque no encontraron diferencias significativas en la producción de proteína en otras salinidades.

Tabla 1. Composición proximal del perifiton bajo diferentes condiciones y cultivos. MS: materia seca; C: cenizas; MSLC: materia seca libre de cenizas; PC: proteína cruda; L: lípidos, ENL: extracto libre de nitrógeno; FC: fibra cruda, E: energía.

Medio	Sustrato	Variable	MS	C	MSLC	PC	L	ENL	FC	E	Referencia
Estanques de tierra sin peces	Bambú (<i>Bambusa</i> sp.), kanchi y hazol (<i>Barringtonia</i> sp.)	Sustrato	3.05-4.89	-	2.17-2.87 mg/cm ²	24.8-38.3%	0.5-9.2%	-	-	18.8-20.4%	(Azim et al., 2002) the effects of artificial substrates on development of periphyton and on water quality were evaluated. Earthen ponds (10 × 7.5m)
Policultivo de <i>Labeo rohita</i> , <i>Catla catla</i> y <i>Cirrhinus mrigala</i> en granja y estaciones.	Bambú	Tiempo	-	19-25%	-	19-26%	2-3.5%	5-11%	-	-	(Azim et al., 2004)
Policultivo de <i>O. niloticus</i> y <i>Etropus suratensis</i>	Bambú	Profundidad,	1.2-1.6 mg/cm ²	41-50%	0.7-0.8 mg.cm ²	20.7-37.9%	1.9-4.2%	-	-	12.1-15 kJ/g ¹	(Garg et al., 2007)
		Con y sin pastoreo		30.4-38.2%							
Tanques de cemento sin peces	Bambú, bagaso, vaina de hoja de areca, hoja de palma, PVC, cerámica, vidrio	Sustratos degradables y no degradables	0.262-0.972 mg/cm ²	17.45-25.88%	0.198-0.772 mg/cm ²	20.07-35.56%	1.42-5.18%	27.07-51.33%	3.81-17.14%	12.07-15.55 kJ/g	(Gangadhara y Keshavnath, 2008)
Jaulas de redes flotantes en estuarios	Pantallas de polietileno	Tiempo	7.16-17.63 mg/cm ²	-	-	0.43-1.76 mg.cm ²	1.21-4.23 mg/cm ²	-	-	-	(Fernandes Da Silva et al., 2008)
Tanques con <i>Semaprochilodus insignis</i>	<i>Pistia stratiotes</i> y pantalla plástica	Sustrato natural y artificial	-	47.11-50.18%	-	26.54-31.50%	3.92-6.88%	14.30-19.90%	-	228.62-241.11 Kcal/100g	(Ramos-Tortolero et al., 2016)

Medio	Sustrato	Variable	MS	C	MSLC	PC	L	ENL	FC	E	Referencia
Tanques de cemento	Caña de azúcar	-	-	32.63%	-	19.66%	1.09%	37.73%	5.97	-	(Umalatha et al., 2017)
Tanques de cemento	Bagazo de caña de azúcar	Fertilizantes: estiércol de ganado, aves y cachaza	17.85-18.25%	32.21-34.20%	-	23.90-27.02%	1.78-2.36%	30.11-32.70%	7.58-8.57%	11.68-12.20 kJ/g	(Gangadhar et al., 2017)
Jaulas flotantes en un estanque de tierra con <i>O. niloticus</i>	Bambú	Área de superficie de sustrato y densidad de siembra	12.40-17.81%	11.40-12.69%	0.09-6.02%	23.8-28.00%	4.21-4.98%	53.29-58.84%	1.54-1.69%	9.92-10.10%	(Tammam et al., 2020)
Estanques con tilapia	Bambú	Tiempo y cantidad de sustrato	0.25-1.11 mg/cm ²	-	-	23.2-26.4 %	0.20%	-	-	-	(David et al., 2022)

El pastoreo puede impulsar una constante producción de biomasa y contrarrestar los efectos de autosombra en comunidades maduras, aunque los niveles de proteína, lípidos y energía podrían disminuir bajo estas condiciones (Azim, Verdegem, et al., 2003; Garg et al., 2007). El pastoreo también puede modificar la composición taxonómica de las algas de la comunidad (Beck et al., 2019), incluso a un mayor nivel que los nutrientes (Hillebrand y Kahlert, 2001). La actividad de los macroinvertebrados también influye en la dinámica de nutrientes en el microecosistema, por medio del consumo y producción de excretas (Haglund y Hillebrand, 2005). Tramonte et al. (2019) emplearon tiras de PVC con cortes paralelos transversales para simular un hábitat (sustrato) complejo, encontrando una disminución del efecto del pastoreo por parte de macroinvertebrados.

La densidad de cultivo genera presión por medio del pastoreo y la cantidad de nutrientes producidos. Garg y Bhatnagar (2016) identificaron que la adición de sustrato con un área adicional del 54% en relación al área superficial del estanque, generaba una mayor biomasa, concentración de pigmentos, cantidad de algas y productividad que las que aportaban un 32% y 72%, y que este trata-

miento era suficiente para generar un crecimiento óptimo para tilapia. Tammam et al. (2020) analizaron los efectos de la densidad de cultivo de tilapia y el área de superficie de sustrato para perifiton, encontrando que 70 peces m³ y un área de superficie de 1,4 m² arrojaban los mejores resultados en cuanto a crecimiento, estado de salud y respuesta inmunitaria en jaulas de 1 m³. Biswas et al. (2022) sugirieron que el perifiton desarrollado en sustratos con un área adicional del 75% respecto al área de superficie del estanque, generó mayor concentración de materia seca y pigmentos con relación al tratamiento con adición de sustrato del 50%, y que este podría reemplazar en un 30% el alimento tradicional en policultivo de *Mugil cephalus*, *Planiliza parsia*, *Chanos chanos* y *Penaeus monodon*.

Oportunidades de la PBA en Colombia

La mayor parte de la producción acuícola en Colombia se produce en estanques (~66%) y en sistemas de jaulas flotantes (~15%), donde la tilapia (*O. niloticus* y *Oreochromis sp.*), trucha (*Oncorhynchus mykiss*), cachama (*Piaractus sp.*) y camarón (*Litopenaeus vannamei*) son las principales especies cultivadas (Carrera-Quintana et al., 2022).

La implementación de tecnologías basadas en perifiton podría significar un aumento en la productividad de estos sistemas, principalmente en los extensivos y semiintensivos. Resulta esencial evaluar las especies más adecuadas para estas aplicaciones. Dada la importancia de la tilapia y la cachama en la producción nacional, se puede considerar la opción de policultivos con especies detritívoras e iliófagas que se beneficien del alimento generado en los sustratos. Esta estrategia daría lugar a un sistema multitrófico integrado, en el que los desechos generados en los estanques pueden ser usados como fertilizantes para el desarrollo de perifiton y fitoplancton; el perifiton y el alimento no consumido son aprovechados por las especies detritívoras-iliófagas, y el plancton por especies filtradoras (Naspirán-Jojoa et al., 2022).

García et al. (2011) evaluaron la introducción de tubos plásticos en un policultivo con bocachico (*Prochilodus magdalenae*) y tilapia (*Oreochromis niloticus*), sin evidenciar efectos sobre los parámetros zootécnicos y físicoquímicos evaluados. Durán-Izquierdo et al. (2020) reportaron mayor peso de bocachico (*P. magdalenae*), a los 90 días de cultivo, en policultivo con cachama híbrida (♀ *Piaractus brachypomus* × ♂ *Colossoma macropomum*) con el uso de varas de madera de plantas locales como sustrato. Sin embargo, este efecto no se mantuvo significativo a lo largo del tiempo, aunque se observó un aumento de la productividad del 33% en el bocachico, respecto a los estanques sin sustratos. En ambos trabajos parte de los resultados se relacionaron con una densidad de siembra elevada. Un elevado ramoneo (pastoreo) sobre los sustratos puede dificultar la renovación de la comunidad perifítica. Esto también se podría suplir aumentando cantidad de sustratos (mayor superficie de colonización).

El cultivo de tilapia también se ha integrado con el camarón amazónico (*Macrobrachium amazonicum*) como especie secundaria. Rodrigues et al. (2019) evaluaron la adición de sustratos de manta geotextil y bambú, cuya área correspondió al 50%

del área de fondo de los estanques. La introducción de los sustratos no afectó el desarrollo de tilapia, pero aumentó la proporción (54,2% y 41,9%, para manta geotextil y bambú respectivamente) de camarones de mayor tamaño (3 g) en comparación con el policultivo sin adición de sustratos (25,6%). En estos sistemas integrados con adición de sustratos también se reportó disminución de la liberación de fósforo en los efluentes (David et al., 2017). La adición de sustratos artificiales (mallas de nailon fijadas verticalmente con un aporte de superficie del 50% con relación al fondo), en estanques de tierra en monocultivo semiintensivo (45 organismos/m²) de camarón amazónico, disminuyó la turbidez, los sólidos suspendidos totales y ortofosfatos, en comparación con estanques sin sustratos y con aireación nocturna.

El bocachico cola rayada o Jaraqui (*Semaprochilodus insignis*), es otra especie iliófaga que ha sido cultivada en sistemas PBAT. Ramos-Tortolero et al. (2016) realizaron cultivos con la adición de sustratos naturales, la macrofito *Pistia stratiotes*, y artificiales, pantallas plásticas, en tres densidades diferentes (aporte del 10, 20 y 30% respecto al área de los estanques). Se encontró una mayor biomasa y diversidad del perifiton en los sustratos naturales, así como un mayor crecimiento de Jaraqui con el tratamiento con 20% de aporte de sustrato natural. Keshavanath et al. (2017) encontraron una mayor biomasa de perifiton, contenido de proteína y clorofila-a en sustratos de bambú (*Bambusa vulgaris*), en comparación con el desarrollado en ambay (*Cecropia pachystachya*) y leucaena (*Leucaena leucocephala*), lo que se tradujo en una mayor productividad (biomasa, sobrevivencia y tasa de crecimiento específico) de Jaraqui.

En cuanto sistemas más intensivos, la introducción de sustratos de bambú ha sido evaluada en el cultivo de *O. niloticus* en jaulas flotantes en embalses de Brasil, donde se encontró una producción de hasta 52 kg/m³ y una reducción del 32% de alimento con la adición de los sustratos (García et al., 2016).

PBA y tecnología Biofloc

La BFT (por sus siglas *Biofloc Technology*) y la PBA tienen varios elementos en común; en ambas tecnologías se fomenta el desarrollo de microorganismos tales como bacterias, algas, protozoos y macroinvertebrados, los cuales se integran a la cadena trófica. Dentro de estos el desarrollo de bacterias heterótrofas y algas puede controlar la concentración de amonio y acelerar la nitrificación; ambos son fuente de alimento natural y tienen potencial probiótico, siendo que estas comunidades microbianas y su efecto puede controlarse manejando las relaciones de C:N (Suryakumar y Avnimelech, 2017). La comunidad perifítica se encuentra adherida a un sustrato por medio de diferentes interacciones moleculares y secreción de sustancias extracelulares poliméricas, en las que sedimentos y materia orgánica quedan inmersos; de manera similar que se constituyen los bioflocs, pero manteniéndose suspendidos en la columna de agua sin adhesión a un sustrato aparente. Algunos autores han sugerido la utilización de sustratos orgánicos suspendidos como aditivos que favorecen la formación de bioflocs alrededor de estos (sitios de nucleación) (Addo

et al., 2021; Peiro-Alcantar et al., 2022). Bajo esta aplicación surge la pregunta: ¿la comunidad microbiana formada alrededor de un sustrato orgánico y qué se mantiene en suspensión podría considerarse como perifiton?

Generalmente la PBA se asocia a una predominancia de algas en la comunidad perifítica mientras que en la BFT a una predominancia de bacterias heterótrofas, sin embargo, la manipulación de la relación C:N y la intensidad de luz puede modificar la proporción entre heterótrofos y autótrofos en la PBA (Anand et al., 2013) y producir bioflocs autótrofos viables (Jung et al., 2017; Martínez-Porchas et al., 2020).

A pesar de esto, son pocos los estudios que han explorado la combinación de estas tecnologías y la mayor parte se han realizado en camarones (Tabla 2). La inclusión de sustratos en un sistema con BFT podría afectar la dinámica de mezcla, aireación y distribución de los sedimentos y flocs en los estanques, pero también podrían disminuir los efectos de competencia por alimentos, canibalismo y favorecer la reproducción por las barreras, alimento y refugio que estos suministran (Marioni et al., 2020).

Tabla 2. Investigaciones realizadas y sus principales resultados en la combinación de tecnología BFT (*Biofloc Technology*) y PBA (*Periphyton Based Aquaculture Technology*).

Especie	Densidad de siembra (org/m ³)	Variables	Sustrato Orientación	Cantidad de sustrato	Relación C:N Fuente	BFT+S frente a BFT		Referencia
						Parámetros FQ	Parámetros zootécnicos	
<i>L. vannamei</i>	238 473	Densidad de cultivo	Mallas de polietileno (I)	100% de aumento del AS del estanque	- Melaza	Mayor NO ₃ ⁻ y menor clorofila a	Mayor S y PF	(Schweitzer et al., 2013)
<i>L. vannamei</i>	300 org/m ²	Área de sustrato	Redes de nailon (I)	201 y 400% (T200 y T400) de aumento de AL del estanque	15-20:2 Melaza	Menor Tr, T, SS	Mayor PF, TCE y menor TCA	(Ferreira et al., 2016)
<i>P. monodon</i>	110	Tipo de sustrato	Bambú (/ 30°) Nailon (I)I	74.7%-75.0% de AS adicional	- Harina de arroz	Menor SS y sólidos de fondo	Mayor PF, GDP, IEP y S y menor TCA	(Kumar et al., 2019)

Especie	Densidad de siembra (org/m ³)	Variables	Sustrato Orientación	Cantidad de sustrato	Relación C:N Fuente	BFT+S frente a BFT		Referencia
						Parámetros FQ	Parámetros zootécnicos	
<i>L. vannamei</i>	500	Aeración	Fibra de poliéster (I)	200% de aumento en AL del estanque	15:1 Melaza	Mayor OD, menor Alc, concentración de TAN y NO ₂ ⁻	Mayor PF y S	(de Morais <i>et al.</i> , 2020)
<i>L. vannamei</i>	500	Área de sustrato	Fibra de poliéster (I)	200 y 400% (T200 y T400) de aumento de AL del estanque	15-20:1 Melaza y salvado de arroz	Menor NO ₃ ⁻ en T400 ³	Mayor TCS, PF, S y P	(de Lara <i>et al.</i> , 2021) three treatments were performed: the control, the treatment without the addition of artificial substrate; T200, the treatment with a 200 % increase in the lateral area of the tanks using artificial substrates; and T400, the treatment with a 400 % increase in the lateral area of the tanks using artificial substrates. The study was conducted in nine 800 L tanks over 60 days. The animals were stocked at an initial density of 300 shrimp. m ⁻² (equivalent to 500 shrimp m ⁻³)
<i>P. vannamei</i>	100	Tipo de sustrato	Bambú, bagazo de caña de azúcar, malla de PVC, de galpón (I y —)	Esteras cuadradas de 0.45 × 0.45 m	10:1 Melaza	Mayor Chl a, menor TAN, NO ₂ ⁻ y NO ₃ ⁻ en tratamientos con sustratos naturales. <i>El control se realizó bajo cultivo sin BFT ni sustratos.</i>	Mayor PF, S, respuesta protectora y efectos inmunomoduladores en tratamientos con sustratos naturales. <i>El control se realizó bajo cultivo sin BFT ni sustratos.</i>	(Mani <i>et al.</i> , 2021)
<i>L. vannamei</i>	1000	-	Bambú (I)	Sustratos de 48x20 cm	15:1 Harina de trigo	Menor OD y pH, NO ₃ ⁻	Mayor GNP, TCE, respuesta inmunitaria y menor TCA	(Chethurajupalli y Tambireddy, 2022)

³Orientación del sustrato: vertical (I), horizontal (—) inclinado (/). Aporte de área adicional de sustratos: área lateral (AL), área de fondo (AF) y área de superficial (AS). Parámetros: alcalinidad (Alc), nitrógeno amoniacal total (TAN), sólidos suspendidos (SS), turbiedad (T) y transparencia (Tr), ganancia neta de peso (GNP), ganancia diaria de peso (GDP), Índice de eficiencia proteica (IEP), peso final (PF), sobrevivencia (S), tasa de conversión alimenticia (TCA), tasa de crecimiento específica (TCE); tasa de crecimiento semanal (TCS), físico químicos (FQ).

Encontrando condiciones adecuadas se podrían ahorrar recursos energéticos necesarios para mantener los flocs y sedimentos en suspensión al proporcionar un sustrato en que parte del biofloc suspendido pueda ser sustituido por biofilm adherido. Los sistemas intermedios de este tipo serían una alternativa y/o paso para granjas con recursos y experiencia insuficiente para implementar los clásicos sistemas BFT (Suryakumar y Avnimelech, 2017). La elevada producción de sedimentos en los BFT es uno de los principales inconvenientes de esta tecnología (Kumar *et al.*, 2019), ya que puede afectar la calidad de agua al aumentar la demanda de oxígeno, la morfología y funcionalidad de las branquias (Angeles-Escobar *et al.*, 2022; Ray *et al.*, 2010).

El aumento de los sólidos suspendidos se puede asociar directamente a la de bioflocs. Ferreira *et al.* (2016) i.e., without the addition of artificial substrate, (2 reportaron una mayor concentración de sólidos suspendidos (flocs) y turbiedad en la columna de agua en un sistema BFT comparado con el mismo sistema con inclusión de sustratos, atribuyendo este fenómeno a una posible disminución en la circulación del agua. Kumar *et al.*, (2019) encontraron que sustratos a base de bambú y malla de nailon podrían capturar entre el 8.5%-13.5% y 31.3%-38.6% de los sólidos suspendidos totales, respectivamente, y reducir la deposición de sólidos de fondo en un 49.43% (bambú) y 37.79% (nailon). Estos autores también identificaron una mejora en el crecimiento, tasa de conversión alimenticia y parámetros inmunológicos en el cultivo de *Penaeus monodon* con la inclusión de sustratos al sistema BFT.

En condiciones de elevada cantidad de sedimentos y baja disponibilidad de luz, algunos grupos de algas pueden llegar a proliferar. Algunas diatomeas pueden desarrollarse bien en sistemas con estas características y llegar a ser una fuente importante de ácidos grasos esenciales, mientras que su crecimiento y mantenimiento puede lograrse con la adición de silicatos (Emerenciano *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2016)

La aireación favorece la nitrificación en los biofilms, como resultado de la oxigenación a las bacterias oxidantes de nitritos (de Morais *et al.*, 2020), lo cual sería compatible con los sistemas BFT. La turbulencia puede causar una mayor biomasa y producción de clorofila a por parte de algunas microalgas perifíticas, en comparación con aguas estancadas, sin embargo, en flujos elevados el desprendimiento de biomasa puede ser mayor al de la producción (Hondzo y Wang, 2002). Encontrar niveles adecuados de aireación que favorezcan la formación de biofilms y flocs capaces de mantener una calidad de agua adecuada y mejorar la productividad, sería uno de los aspectos importantes a tener en cuenta para la puesta en punta de estas tecnologías híbridas.

Otros aspectos a tener en cuenta son el tipo de sustrato, orientación, densidad, fertilización, relación C:N, fuente de carbono y disponibilidad e intensidad de luz (Yadav *et al.*, 2022), factores comunes a tener en cuenta en la PBA, pero que pueden requerir ser ajustados en sistemas híbridos.

Los estudios que han explorado la combinación de estas tecnologías han demostrado una mejora en la calidad de agua y parámetros productivos en la producción de camarones (Tabla 2) y presentan un potencial para disminuir la cantidad de alimentos suministrada. Lara *et al.* (2017) identificaron que era posible disminuir hasta un 35% la cantidad de alimento artificial suministrada a *L. vannamei* con estos sistemas híbridos.

Aun con una pobre producción de perifiton, la inclusión de sustratos en sistemas BFT con camarones puede reducir la densidad poblacional relativa, atenuando el estrés, competencia y canibalismo entre las especies cultivadas, lo que puede conllevar a una mayor productividad (Martínez-Córdova *et al.*, 2015; Schweitzer *et al.*, 2013).

Son escasos los estudios realizados en peces, siendo un campo poco explorado. Se han realizado algunos ensayos en tilapia del Nilo, pero no han

arrojado mejoras significativas en la productividad de los peces o en la calidad del agua (Cavalcante *et al.*, 2016, 2017).

Sistemas de biorremediación y producción de productos de valor agregado

El perifiton tiene la ventaja de presentar un agregado de microorganismos que, en conjunto, tienen un mayor potencial metabólico. Los flujos de materia y energía se dan en un espacio reducido integrado gracias a una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (EPS por sus siglas en inglés), que también pueden inmovilizar nutrientes y otras moléculas (Sheng *et al.*, 2010). Esto favorece que los residuos sean manejados por diferentes tipos de organismos de una manera más eficiente que en "espacios abiertos", y que una mayor variedad de moléculas puedan ser metabolizadas (Wu *et al.*, 2014).

Se han desarrollado sistemas de biofiltración basados en perifiton, comúnmente llamados *Agal Turf Scrubber* (ATS, por sus siglas en inglés) en los cuales el agua a tratar fluye por una matriz perifítica que capta los desechos (principalmente nutrientes) derivados de la actividad acuícola, para producir biomasa algal.

A manera de ejemplo, el sistema ATS descrito por Valeta y Verdegem (2015) consta de un par de rejillas que sostienen una matriz periférica sumergidas en una fina capa de agua a tratar, en la cual se genera una ligera turbulencia que ayuda a mantener la oxigenación. Los nutrientes residuales (TAN) de la actividad acuícola son empleados por las algas para su crecimiento y estas son cosechadas de la capa superficial, manteniendo la capa inferior para asegurar su rápido desarrollo. El agua que pasa por el ATS ingresa nuevamente a los tanques de cultivo, conformando un eficiente sistema de recirculación (Figura 1).

La biomasa de algas producida puede presentar un potencial uso como biocombustible, biofertilizante, fuente de metabolitos de alto valor o alimento (Adey *et al.*, 2011; Ray *et al.*, 2015). Savonitto *et al.*

(2021) remplazaron del 50 al 100% de la harina de pescado en la alimentación de dorada (*Sparus aurata*) con perifiton proveniente de biofiltros derivados del cultivo de la misma especie, encontrando que el remplazo del 50% mejoró la tasa de conversión alimenticia y el remplazo total trajo consigo un crecimiento más lento (15%) pero con un mayor contenido de proteína (59% frente a 52% en el control). Alimentos a base de *Ulva*, provenientes de biofiltros, también se ha usado para remplazar harina de pescado en dietas de esta especie, significando una disminución en los costos de alimentación de cerca del 10% (Shpigel *et al.*, 2017) y del 30% en la tasa de conversión alimenticia (Savonitto *et al.*, 2021). En cuanto a los biocombustibles, estos pueden llegar a producir de 5 a 10 veces más biocombustible (butanol y biodiesel) por unidad de área que otros cultivos tradicionales terrestres, como el maíz y la soya (Adey *et al.*, 2013).

La inclusión de *Stigeoclonium nanum* en un sistema RAS trajo consigo una disminución significativa ($p < 0,05$) de nitrito, nitrato y fosfato en comparación con un sistema sin inclusión de esta alga (Mohamed Ramli *et al.*, 2018).

Se pueden emplear varios biofiltros de diferente naturaleza para maximizar el proceso de tratamientos. Biofiltros secuenciales con microalgas perifíticas y macroalgas como *Ulva*, se han empleado para aumentar la remoción de TAN y nitratos (Guttman *et al.*, 2019; Shahar y Guttman, 2020, 2021). La complementación con biofilms bacterianos y macrofitas acuáticas también puede disminuir la disposición de nutrientes (Li *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2016).

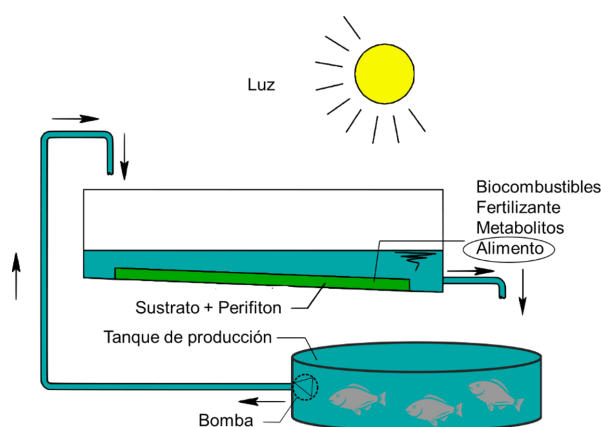
Los principales factores que influyen en la remoción de nutrientes por parte de las algas perifíticas, están relacionados con la disponibilidad de luz y el tiempo de retención hidráulica necesario para que el perifiton capte los nutrientes, que generalmente implican una mayor área de sustrato (Ramli *et al.*, 2020)

Ulva ohnoi ha demostrado eliminar el 100% de fosfato (concentraciones iniciales de 1,9, 3,8, 5,8, y 8,8

mg.L⁻¹) y amonio (NH₄-N concentraciones iniciales de 0.7, 1.5, 2.2, y 3.3 mg. L⁻¹) en 24 h en sistemas (ATS) con tiempos de maduración de 18 días (Salvi *et al.*, 2021) identificaron que el algodón trenzado como sustrato, presenta un mejor desarrollo de biopelícula en comparación con otros sustratos comerciales, y que en un tiempo de retención hidráulica de seis días puede llegar a presentar tasas de eliminación de N y P de 88.5 ± 6.2 % y 99.8 ± 0.2 %, respectivamente, a partir de aguas con concentraciones de N de 14.5 y P de 1.21 mg/l. Además, la biopelícula colectada presentó hasta 21.8 ± 3.4 mg/Kg de Se, lo que la hace un potencial biofertilizante. El sistema desarrollado por los autores fue denominado reactor por lotes de biopelículas de algas-bacterias (ABBR, por sus siglas en inglés *Algal-Bacterial Biofilm Batch Reactor*). Barnharst *et al.* (2018) implementaron un biofilm basado en el hongo *Mucor indicus* y la microalga *Chlorella vulgaris* como biofiltros, siendo capaces de reducir aproximadamente el 100% de TAN bajo concentraciones iniciales de 25 mg/l de TAN en 48 horas.

Los resultados obtenidos en sistemas ATS a base de *Ulva* o complementados con algas de este género, sugieren su elevada capacidad de captar nutrientes y potencial uso como alimento para disminuir la demanda de harina de pescado.

Figura 1. Esquema de un sistema ATS para la acuicultura. Adaptado y modificado de Valchev y Ribarova (2022).



EL PERIFITON COMO HERRAMIENTA EN EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN ACUICULTURA

La comunidad perifítica puede responder de una manera rápida a los cambios en la fisicoquímica del agua, lo cual se ve reflejado en la composición y estructura de la comunidad. Esto puede aplicarse como una herramienta para evaluar la calidad de agua en los sistemas acuícolas y los ecosistemas en los que estos puedan tener incidencia. Índices de diversidad clásicos (diversidad alfa), diversidad funcional y rasgos biológicos, análisis multivariados y otros índices ecológicos (Mannino y Sara, 2008) son herramientas utilizadas en la acuicultura para evaluar cómo esta actividad podría afectar la dinámica de los ecosistemas naturales.

Los efectos de la acumulación de nutrientes puede causar disminución de la diversidad de especies por la proliferación de oportunistas, como lo encontrado por Mannino y Sara (2008) quienes además identificaron que la proporción de algas *Rodophyceae/Phaeophyceae*, puede ser un indicador del enriquecimiento de nutrientes en cultivos de peces en ecosistemas marinos. Sanz-Lázaro *et al.*, (2011) encontraron una mayor acumulación de carbono orgánico, nutrientes, selenio y metales, además de cambios en la estructura de la comunidad perifítica en ecosistemas costeros con influencia de actividad acuícola.

Si bien los nutrientes son uno de los principales desechos de la industria, otro tipo de derivados, como los antibióticos, pueden impactar de manera considerable las comunidades microbianas de los ecosistemas naturales.

Uroosa *et al.* (2021) evaluaron el efecto nitrofurazona sobre los rasgos funcionales de un ensamblaje de protozoarios perifíticos marinos, evidenciando una disminución drástica en los patrones y diversidad funcional de la comunidad a concentraciones de 12 mg/ml después de un tiempo de expo-

sición de 12 horas. Para este antibiótico también se ha sugerido que el cambio en el tamaño en ciliados periféricos podría emplearse como un indicador de su toxicidad (Kazmi *et al.*, 2022) some biological responses known as biomarkers can be used as powerful tools to evaluate the ecotoxicity. In this study, we investigated the disparity of responses shown by body-size spectra of periphytic ciliate communities when used as biomarkers to detect the toxicity of the broad-spectrum veterinary antibiotic nitrofurazone. Briefly, in chronic exposure experiments ciliate communities were exposed to different concentrations (0, 1, 2, 4 and 8 mg ml⁻¹. Wang *et al.* (2022) estudiaron los efectos de oxitetraciclina en el fitoperifiton y su efecto sobre las concentraciones de nitrógeno y fósforo en la columna de agua, encontrando que después de ocho días de exposición a diferentes concentraciones del antibiótico, la comunidad recuperó su función natural.

CONCLUSIONES

Las aplicaciones del perifiton en la acuicultura se han basado principalmente en la producción de alimento y en el manejo de la calidad de agua. En la PBA tradicional, la CN-CP puede considerarse un intermedio entre esta tecnología y la BFT, dado que permite el desarrollo de agregados microbianos de bacterias heterótrofas y algas que constituyen un potencial alimento de calidad, al mismo tiempo que disminuyen la cantidad de desechos nitrogenados en la producción, sumado a la resuspensión de sólidos por la actividad de peces como la tilapia. La CN-CP representa así una alternativa potencialmente menos compleja y costosa que facilitaría una producción mejorada para los productores con difícil acceso a la BFT. La combinación de la PBA y la BFT también ha demostrado resultados prometedores en el cultivo de camarones, pero aun es un campo poco explorado en el cultivo de peces. En cuanto a sistemas de biofiltros a base de perifiton, estos han demostrado una eficiente retención de nutrientes y la biomasa producida puede ser cosechada para ser usada como alimento. Esta comunidad también tiene el potencial de ser

una herramienta útil para monitorear los disturbios que la industria pueda causar en las fuentes hídricas.

Hace falta mayor investigación en el análisis a profundidad de las relaciones entre las comunidades microbianas, la calidad del agua y los organismos cultivados, en el que las herramientas ómicas podrían ofrecer un aporte significativo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Órgano Colegiado de Administración y Decisión (OCAD) de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) del Sistema General de Regalías (SGR) por la financiación del Proyecto "Formación de alto nivel de talento humano en articulación con las potencialidades y vocaciones del Departamento del Meta- Universidad de los Llanos, Meta" con código BPIN 2021000100100, del cual el estudiante Julián Camilo Barreto Montenegro es beneficiario.

REFERENCIAS

- Abwao JO, Boera PN, Munguti JM, Orina PS, Erick O. The potential of periphyton based aquaculture for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) production. A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2014;2(1):147-152.
- Addo FG, Zhang S, Manirakiza B, Ohore OE, Shudong Y. The impacts of straw substrate on biofloc formation, bacterial community and nutrient removal in shrimp ponds. *Biore-source Technology*. 2021;326(124727):1-11.
- Adey WH, Kangas PC, Mulbry W. Algal turf scrubbing: Cleaning surface waters with solar energy while producing a biofuel. *BioScience*. 2011;61(6):434-441.
- Adey WH, Laughinghouse HD, Miller JB, Hayek LAC, Thompson JG, Bertman S, Hampel K, Puvanendran S. Algal turf scrubber (ATS) flowways on the Great Wicomico River, Chesapeake Bay: Productivity, algal community

- structure, substrate and chemistry. *Journal of Phycology*. 2013;49(3):489–501.
- Anand PSS, Kumar S, Panigrahi A, Ghoshal TK, Syama Dayal J, Biswas G, Sundaray JK, De D, Ananda Raja R, Deo AD, Pillai SM, Ravichandran P. Effects of C:N ratio and substrate integration on periphyton biomass, microbial dynamics and growth of *Penaeus monodon* juveniles. *Aquaculture International*. 2013;21(2):511–524.
- Angeles-Escobar BE, da Silva SMBC, Severi W. Growth, red blood cells, and gill alterations of red pacu (*Piaractus brachypomus*) fingerlings by chronic exposure to different total suspended solids in biofloc. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2022;53(3):652–668.
- Asaduzzaman M, Wahab MA, Verdegem MCJ, Adhikary RK, Rahman SMS, Azim ME, Verreth JAJ. Effects of carbohydrate source for maintaining a high C:N ratio and fish driven re-suspension on pond ecology and production in periphyton-based freshwater prawn culture systems. *Aquaculture*. 2010;301(1-4):37–46.
- Asaduzzaman M, Wahab MA, Verdegem MCJ, Huque S, Salam MA, Azim ME. C/N ratio control and substrate addition for periphyton development jointly enhance freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* production in ponds. *Aquaculture*. 2008;280(1-4):117–123.
- Asaduzzaman M, Wahab MA, Verdegem MCJ, Mondal MN, Azim ME. Effects of stocking density of freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* and addition of different levels of tilapia *Oreochromis niloticus* on production in C/N controlled periphyton based system. *Aquaculture*. 2009;286(1-2):72–79.
- Azim ME, Milstein A, Wahab MA, Verdegem MCJ. Periphyton - Water quality relationships in fertilized fishponds with artificial substrates. *Aquaculture*. 2003;228(1-4):169–187.
- Azim ME, Rahaman MM, Wahab MA, Asaeda T, Little DC, & Verdegem MCJ. Periphyton-based pond polyculture system: A bioeconomic comparison of on-farm and on-station trials. *Aquaculture*. 2004;242:381–396.
- Azim ME, Verdegem MCJ, Mantingh I, Dam AA Van, Beveridge MCM. Ingestion and utilization of periphyton grown on artificial substrates. *Aquaculture Research*. 2003;34(4):85–92.
- Azim ME, Wahab MA, Verdegem MCJ, Van Dam AA, Van Rooij JM, Beveridge MCM. The effects of artificial substrates on freshwater pond productivity and water quality and the implications for periphyton-based aquaculture. *Aquatic Living Resources*. 2002;15(4):231–241.
- Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD, Stribling JB. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Wadeable Streams and Rivers. Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish*. 1999. 2nd ed. US Environmental Protection Agency Office of Water, Washington, D.C., p. 339.
- Barlaya G, Umalatha H, Hegde G, Ananda Kumar BS, Raghavendra CH. Growth performance, carcass composition, and digestive enzyme activity of *Labeo fimbriatus* in tanks provided with feed and periphyton substrate in two orientations. *Journal of Applied Aquaculture*. 2021;1–12.
- Barnharst T, Rajendran A, Hu B. Bioremediation of synthetic intensive aquaculture wastewater by a novel feed-grade composite biofilm. *International Biodeterioration Biodegradation*. 2018;126:131–142.
- Beck WS, Markman DW, Oleksy IA, Lafferty MH, Poff NLR. Seasonal shifts in the importance of bottom-up and top-down factors on stream periphyton community structure. *Oikos*. 2019;128(5):680–691.
- Biswas G, Kumar P, Ghoshal TK, Das S, De D, Bera A, Anand PSS, Kailasam M. Periphyton: A natural fish food item for replacement of feed at optimized substrate surface area for cost-effective production in brackishwater polyculture. *Aquaculture*. 2022;561:738672.

- Carrera-Quintana SC, Gentile P, Girón-Hernández J. An overview on the aquaculture development in Colombia: Current status, opportunities and challenges. *Aquaculture*. 2022;56:738583.
- Cavalcante DDH, Lima FR, Rebouças VT, Sá MV. Association between periphyton and bioflocs systems in intensive culture of juvenile Nile tilapia. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 2016;38(2):119-125.
- Cavalcante DDH, Lima FRDS, Rebouças VT, Sá MVDCE. Nile tilapia culture under feeding restriction in bioflocs and bioflocs plus periphyton tanks. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 2017 39(3): 223-228.
- Chethurajupalli L, Tambireddy N. Rearing of White Leg Shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in Biofloc and Substrate Systems: Microbial Community of Water, Growth and Immune Response of Shrimp. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2022;22(3):1-15.
- da Silva JLS, Cavalcante DDH, de Carvalho FCT, Vieira RHSDF, e Sá MVDC, de Sousa OV. Aquatic microbiota diversity in the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using bioflocs or periphyton: virulence factors and biofilm formation. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*. 2016;38(3): 233-241.
- David FS, Proença DC, Valenti WC. Phosphorus Budget in Integrated Multitrophic Aquaculture Systems with Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, and Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2017;48(3):402-414.
- David LH, Pinho SM, Romera DM, Campos DWJ, Franchini AC, & Garcia F. Tilapia farming based on periphyton as a natural food source. *Aquaculture*. 2022;547:737544).
- Durán-Izquierdo JC, Mindiola-Romo RJ, Wills-Franco GA, Pardo-Carrasco SC, Muñoz-Ramírez AP. Uso de perifiton en un sistema de policultivo en agro acuicultura integrada en la comunidad indígena de Jimaín (Colombia). *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 2020;67(3):262-275
- de Lara GR, Poersch LH, Wasielesky W. The quantity of artificial substrates influences the nitrogen cycle in the biofloc culture system of *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering*. 2021;94:102171.
- de Morais APM, Abreu PC, Wasielesky W, Krummenauer D. Effect of aeration intensity on the biofilm nitrification process during the production of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in Biofloc and clear water systems. *Aquaculture*. 2020;514:734516.
- Emerenciano MGC, Arnold S, Perrin T. Sodium metasilicate supplementation in culture water on growth performance, water quality and economics of indoor commercial-scale biofloc-based *Litopenaeus vannamei* culture. *Aquaculture*. 2022;560:738566.
- Fernandes Da Silva C, Ballester E, Monserrat J, Geracitano L, Wasielesky W, & Abreu PC. Contribution of microorganisms to the biofilm nutritional quality: Protein and lipid contents. *Aquaculture Nutrition*. 2008;14(6):507-514.
- Ferreira LMH, Lara G, Wasielesky W, Abreu PC. Biofilm versus biofloc: Are artificial substrates for biofilm production necessary in the BFT system? *Aquaculture International*. 2016;24(4):921-930.
- FAO-Food Agriculture Organization. 2020. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. En: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. La sostenibilidad en acción, Roma, p. 223.
- Gangadhar B, Sridhar N, Umalatha H, Ganesh H, Jayasankar P. Taxonomic and Biochemical Composition and Digestive Enzyme Activity of Periphyton and Plankton: A Comparative Study. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 2018;88(2):715-720.

- Gangadhar B, Umalatha H, Hegde G, Vasundhara R, Sridhar N. Influence of Commonly used Manures on the Growth and Nutrient Composition of Periphyton. *Insights Aquac Cult Biotechnol.* 2017;1(1):1-6.
- Gangadhara B, Keshavanath P. Planktonic and Biochemical Composition of Periphyton Grown on Some Biodegradable and Non-Degradable Substrates. *Journal of Applied Aquaculture.* 2008;20213-232.
- Garcia F, Romera DM, Sousa NS, Paiva-Ramos I, Onaka EM. The potential of periphyton-based cage culture of Nile tilapia in a Brazilian reservoir. *Aquaculture.* 2016;464229-235.
- García JJ, Celis LM, Villalba EL, Mendoza LC, Brú SB, Atenció VJ, Pardo SC. Evaluación del policultivo de bocachico *Prochilodus magdalenae* y tilapia *Oreochromis niloticus* utilizando superficies fijadoras de perifiton. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia.* 2011;58(2):71-83.
- Garg SK, Bhatnagar S. Influence of periphyton substrate density on hydrobiological characteristics and growth performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus 1758) stocked in inland saline groundwater ponds. *International Journal of Fisheries and aquatic studies.* 2016;4(4):444-452.
- Garg SK, Kumar A, Arasu ART, Bhatnagar A, Jana SN, Barman UK. Effect of periphyton and supplementary feeding on growth performance and nutritive physiology of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and pearlspot, *Etioplos suratensis*, under polyculture. *Journal of Applied Aquaculture.* 2007;19(3):19-45.
- Gubelit YI, & Grossart, HP. New Methods, New Concepts: What Can Be Applied to Freshwater Periphyton? *Frontiers in Microbiology.* 2008;11(June),1-11.
- Guttman L, Neori A, Boxman SE, Barkan R, Shahr B, Tarnecki AM, Brennan NP, Main KL, Shpigel M. An integrated *Ulva*-periphyton biofilter for mariculture effluents: Multiple nitrogen removal kinetics. *Algal Research.* 2019;42:101586.
- Haglund AL, Hillebrand H. The effect of grazing and nutrient supply on periphyton associated bacteria. *FEMS Microbiology Ecology.* 2005;52(1):31-41.
- Han W, Mao Y, Wei Y, Shang P, Zhou X. Bioremediation of Aquaculture Wastewater with Algal-Bacterial Biofilm Combined with the Production of Selenium Rich Biofertilizer. *Water.* 2020;12(2071):1-16.
- Haque MR, Islam MA, Rahman MM, Shirin MF, Wahab MA, Azim ME. Effects of C/N ratio and periphyton substrates on pond ecology and production performance in giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) and tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) polyculture system. *Aquaculture Research.* 2015;46(5):1139-1155.
- Hillebrand H, Kahlert M. Effect of grazing and nutrient supply on periphyton biomass and nutrient stoichiometry in habitats of different productivity. *Limnology and Oceanography.* 2001;46(8):1881-1898.
- Hondzo M, Wang H. Effects of turbulence on growth and metabolism of periphyton in a laboratory flume. *Water Resources Research.* 2002;38(12):13-1.
- Jung JY, Damusaru JH, Park Y, Kim K, Seong M, Je HW, Kim S, Bai SC. Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* positively affects performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Algal Research.* 2017;27259-264.
- Kazmi SSUH, Uroosa, Warren A, Zhong X, Xu H. Insights into the ecotoxicity of nitrofurazone in marine ecosystems based on body-size spectra of periphytic ciliates. *Marine Pollution Bulletin.* 2022;174:113217.
- Keshavanath P, Leao da Fonseca FA, Affonso EG, Nobre AD, Jeffson. N P. Periphyton Growth

- on Three Bio-substrates and Its Influence on the Performance of Jaraqui (*Semaprochilodus insignis*). *International Journal of Aquaculture*. 2017;7(13):86–93.
- Khatoon H, Banerjee S, Yusoff FM, Shariff M. Effects of salinity on the growth and proximate composition of selected tropical marine periphytic diatoms and cyanobacteria. *Aquaculture Research*, 2010;41(9):1348–1355.
- Khatoon H, Yusoff F, Banerjee S, Shariff M, & Bujang JS. Formation of periphyton biofilm and subsequent biofouling on different substrates in nutrient enriched brackishwater shrimp ponds. *Aquaculture*. 2007a;273(4):470–477.
- Khatoon H, Yusoff FM, Banerjee S, Shariff M, Mohamed S. Use of periphytic cyanobacterium and mixed diatoms coated substrate for improving water quality, survival and growth of *Penaeus monodon* Fabricius postlarvae. *Aquaculture*. 2007b; 271(1–4):196–205.
- Kumar S, Shyne Anand PS, De D, Ghoshal TK, Alavandi S V., Vijayan KK. Integration of substrate in biofloc based system: Effects on growth performance, water quality and immune responses in black tiger shrimp, *Penaeus monodon* culture. *Aquaculture Research*. 2019;50(10):2986–2999.
- Lara G, Honda M, Poersch L, Wasielesky W. The use of biofilm and different feeding rates in biofloc culture system: the effects in shrimp growth parameters. *Aquaculture International*, 2017;25(5):1959–1970.
- Li Z, Che J, Xie J, Wang G, Yu E, Xia Y, Yu D, Zhang K. Microbial succession in biofilms growing on artificial substratum in subtropical freshwater aquaculture ponds. *FEMS Microbiology Letters*, 2017;364(4):1–7.
- Li Z, Yu E, Zhang K, Gong W, Xia Y, Tian J, Wang G, Xie J. Water Treatment Effect, Microbial Community Structure, and Metabolic Characteristics in a Field-Scale Aquaculture Wastewater Treatment System. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11(June):1–13.
- Liu J, Wang F, Liu W, Tang C, Wu C, Wu Y. Nutrient removal by up-scaling a hybrid floating treatment bed (HFTB) using plant and periphyton: From laboratory tank to polluted river. *Bioresource Technology*. 2016;207:142–149.
- Mani S, Mullaivanam Ramasamy S, Chakrapani S, Krishna A, Shyne Anand PS, Lalramchhani C, Antony J, Panigrahi A. The effect of natural and artificial periphytic substrates with biofloc system on shrimp *Penaeus vannamei* (Boone 1931) culture: growth and immune response. *Aquaculture International*. 2021;29(2):651–668.
- Mannino AM, Sara G. Effects of fish-farm biodeposition on periphyton assemblages on artificial substrates in the southern Tyrrhenian Sea (Gulf of Castellammare, Sicily). *Aquatic Ecology*. 2008;42(4):575–581.
- Marioni D, Kassan NA, Ikhwanuddin M. Review of Attached and Suspended Biomass Applications Integrated to Recirculating Aquaculture Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;416(1).
- Martínez-Córdova LR, Emerenciano M, Miranda-Baeza A, Martínez-Porchas M. Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: An updated review. *Reviews in Aquaculture*. 2015;7(2):131–148.
- Martinez-Porchas M, Ezquerro-Brauer M, Mendoza-Cano F, Chan-Higuera JE, Vargas-Albores F, Martinez-Cordova LR. Effect of supplementing heterotrophic and photoautotrophic biofloc, on the production response, physiological condition and post-harvest quality of the whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*. 2020;16:100257.
- Martins TG, Odebrecht C, Jensen L V., D'Oca MG, Wasielesky W. The contribution of diatoms to bioflocs lipid content and the performance of juvenile *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in a BFT culture system. *Aquaculture Research*. 2014;1–12.

- Milsteina A, Azim ME, Wahab MA, Verdegem MCJ. The effects of periphyton, fish and fertilizer dose on biological processes affecting water quality in earthen fish ponds. *Environmental Biology of Fishes*. 2003;68:247–260.
- Mohamed Ramli N, Yusoff FM, Giatsis C, Tan GYA, Verreth JAJ, Verdegem MCJ. Effects of *Stigeoclonium nanum*, a freshwater periphytic microalga on water quality in a small-scale recirculating aquaculture system. *Aquaculture Research*. 2018;49(11):3529–3540.
- Montuelle B, Dorigo U, Bérard A, Volat B, Bouchez A, Tlili A, Gouy V, Pesce S. The periphyton as a multimetric bioindicator for assessing the impact of land use on rivers: an overview of the Ardières-Morcille experimental watershed (France). 2010. En: Stevenson RJ, Sabater S, (editores). *Global Change and River Ecosystems—Implications for Structure, Function and Ecosystem Services*. *Global Change and River Ecosystems—Implications for Structure, Function and Ecosystem Services*. *Developments in Hydrobiology*, p. 123–141.
- Naspirán-Jojoa DC, Fajardo-Rosero AG, Ueno-Fukura M, Collazos-Lasso LF. Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): Una revisión. *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*. 2022;69(1):75–97.
- Neori A, Shpigiel M, Guttman L, Israel A. Development of polyculture and integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Israel: A review. *Israeli Journal of Aquaculture -Bamidgeh*. 2017;69:1–19.
- Peiro-Alcantar CI, Miranda-Baeza A, Garibay-Valdez E, Martínez-Córdova LR, Vargas-Albores F, Cicala F, Gómez-Reyes R, Martínez-Porchas M. Mature biofloc harbor similar bacterial communities regardless of the vegetal floating substrates (oat, amaranth, or wheat) used as promoters. *Aquaculture International*. 2022;91–15.
- Ramli NM, Verreth JAJ, Yusoff FM, Nurulhuda K, Nagao N, Verdegem MCJ. Integration of Algae to Improve Nitrogenous Waste Management in Recirculating Aquaculture Systems: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020;8(1004):1–18.
- Ramos-Tortolero SA, Sagratski-Cavero BA, Gomes de Brito J, Soares-Correa C, da Silva-Junior JL, de Barlaya-Almeida JC, Barlaya G, Perar K. Periphyton-Based Jaraqui (*Semaprochilodus insignis*) Culture with Two Types of Substrates at Different Densities. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2016;16(4): 953–959.
- Ray AJ, Lewis BL, Browdy CL, Leffler JW. Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems. *Aquaculture*. 2010;299(1–4): 89–98.
- Ray NE, Terlizzi DE, Kangas PC. Nitrogen and phosphorus removal by the Algal Turf Scrubber at an oyster aquaculture facility. *Ecological Engineering*. 2015;78:27–32.
- Rivera-Usme JJ, Pinilla-Agudelo G, Camacho Pinzón DL. Grupos tróficos de macroinvertebrados acuáticos en un humedal urbano andino de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. 2013;18(2):279–292.
- Rodrigues CG, Garcia BF, Verdegem M, Santos MR, Amorim RV, Valenti WC. Integrated culture of Nile tilapia and Amazon river prawn in stagnant ponds, using nutrient-rich water and substrates. *Aquaculture*. 2019;503:111–117.
- Ruby P, Ahilan B, Prabu E. Periphyton Based Aquaculture: a Review. *Journal of Aquaculture in the Tropics*. 2018;33(01):35–48.
- Saikia SK, Das DN. Potentiality of Periphyton-based Aquaculture Technology in Rice-fish Environment. *Journal of Scientific Research*. 2009;1(3):624–634.

- Salvi KP, da Silva Oliveira W, Horta PA, Rörig LR, de Oliveira Bastos E. A new model of Algal Turf Scrubber for bioremediation and biomass production using seaweed aquaculture principles. *Journal of Applied Phycology*. 2021;33(4):2577–2586.
- Santhana Kumar V, Pandey PK, Anand T, Bhuvaneshwari R, Kumar S. Effect of periphyton (aquamat) on water quality, nitrogen budget, microbial ecology, and growth parameters of *Litopenaeus vannamei* in a semi-intensive culture system. *Aquaculture*. 2017;479:240–249.
- Sanz-Lázaro C, Navarrete-Mier F, Marín A. Biofilm responses to marine fish farm wastes. *Environmental Pollution*. 2011;159(3):825–832.
- Savonitto G, Barkan R, Harpaz S, Neori A, Chernova H, Terlizzi A, Guttman L. Fishmeal replacement by periphyton reduces the fish out ratio and alimentation cost in gilthead sea bream *Sparus aurata*. *Scientific Reports*. 2021;11(1):1–10.
- Schweitzer R, Arantes R, Baloi MF, Costódio PFS, Arana LV, Seiffert WQ, Andreatta ER. Use of artificial substrates in the culture of *Litopenaeus vannamei* (Biofloc System) at different stocking densities: Effects on microbial activity, water quality and production rates. *Aquacultural Engineering*. 2013;54:93–103.
- Shahar B, Guttman L. An integrated, two-step biofiltration system with *Ulva fasciata* for sequenced removal of ammonia and nitrate in mariculture effluents. *Algal Research*. 2020;52:102120.
- Shahar B, Guttman L. Integrated biofilters with *Ulva* and periphyton to improve nitrogen removal from mariculture effluent. *Aquaculture*. 2021;532:736011.
- Sharif Uddin M, Milsten A, Ekram Azim M, Abdul Wahab M, Verdegem M, Verreth J. Effects of stocking density, periphyton substrate and supplemental feed on biological processes affecting water quality in earthen tilapia-prawn polyculture ponds. *Aquaculture Research*. 2008;39(12):1243–1257.
- Sheng G, Yu H, Li X. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*. 2010;28(6):882–894.
- Shilta MT, Chadha NK, Pandey PK, Sawant PB. Effect of biofilm on water quality and growth of *Etroplus suratensis* (Bloch, 1790). *Aquaculture International*. 2016;24(2):661–674.
- Shpigel M, Guttman L, Shauli L, Odintsov V, Ben-Ezra D, Harpaz S. *Ulva lactuca* from an Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) biofilter system as a protein supplement in gilthead seabream (*Sparus aurata*) diet. *Aquaculture*. 2017;481:112–118.
- Shyne-Anand PS, Kohli MPS, Dam Roy S, Sundaray JK, Kumar S, Sinha A, Pailan GH, Sukham M kumar. Effect of dietary supplementation of periphyton on growth, immune response and metabolic enzyme activities in *Penaeus monodon*. *Aquaculture Research*. 2015;46(9):2277–2288.
- Singh S, James A, Bharose R. Biological assessment of water pollution using periphyton productivity: A review. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2017;16(2):559–567.
- Suryakumar B, Avnimelech Y. Adapting Biofloc Technology for Use in Small Scale Ponds with Vertical Substrate. *World Aquaculture*. 2017;48(3):54–58.
- Tammam MS, Wassef EA, Toutou MM, El-Sayed AFM. Combined effects of surface area of periphyton substrates and stocking density on growth performance, health status, and immune response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) produced in cages. *Journal of Applied Phycology*. 2020;32(5):3419–3428.
- Tramonte RP, Osório NC, Ragonha FH, Pinha GD, Rodrigues L, Mormul RP. Periphyton

- consumption by an invasive snail species is greater in simplified than in complex habitats. *Canadian Journal of Zoology*. 2019;97(1):13-21.
- Trbojević I, Jovanović J, Kostić D, Popović S, Predojević D, Karadžić V, Simić GS. Periphyton Developed on Artificial Substrates: Effect of Substrate Type and Incubation Depth. *Russian Journal of Ecology*. 2018;49(2):135-142.
- Umalatha UH, Gangadhar B, Sridhar N, Umalatha H, Ganesh H, Simon ART, Jayasankar P. Digestibility and digestive enzyme activity in *Labeo fimbriatus* (Bloch, 1795) fed periphyton grown on sugarcane bagasse. *Article in Indian Journal of Fisheries*. 2017;64(1):37-43.
- Uroosa, Kazmi SSUH, Zhong X, Xu H. An approach to evaluating the acute toxicity of nitrofurazone on community functioning using protozoan periphytons. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;173(113066):1-8.
- Valchev D, Ribarova I. A Review on the Reliability and the Readiness Level of Microalgae-Based Nutrient Recovery Technologies for Secondary Treated Effluent in Municipal Wastewater Treatment Plants. *Processes*. 2022;10(399):1-28.
- Valeta J, Verdegem M. Removal of nitrogen by Algal Turf Scrubber Technology in recirculating aquaculture system. *Aquaculture Research*. 2015;46(4):945-951.
- Wang Z, Yin S, Chou Q, Zhou D, Jeppesen E, Wang L, Zhang W. Community-level and function response of photoautotrophic periphyton exposed to oxytetracycline hydrochloride. *Environmental Pollution*. 2022;294:118593.
- Wetzel RG. Periphyton of freshwater ecosystems. 1983. En: *Proceedings of the First International Workshop on Periphyton of Freshwater Ecosystems held in Vaxjo, Sweden* (p. 346). Dr. W. Junk Publishers, The Netherlands, p.346.
- Wu Y. Periphyton. 2017. *Functions and Application in Environmental Remediation*. Elsevier, Amsterdam, p. 402.
- Wu Y, Xia L, Yu Z, Shabbir S, Kerr PG. In situ bioremediation of surface waters by periphytons. *Bioresource Technology*. 2014;151:367-372.
- Yadav SR, Chavan BR, Chadha NK, Naik SD, KKK, Sawant PB. Algal-bacterial intervention as a management tool for next-generation aquaculture sustainability. *Journal of environmental biology*. 2022;43:485-497.
- Yu E, Xie J, Wang J, Ako H, Wang G, Chen Z, Liu Y. Surface-attached and suspended bacterial community structure as affected by C/N ratios: relationship between bacteria and fish production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2016;32(116):1-9.
- Zhang N, Li H, Jeppesen E, Li W. Influence of substrate type on periphyton biomass and nutrient state at contrasting high nutrient levels in a subtropical shallow lake. *Hydrobiologia*. 2013;710(1):129-141.