

## Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): una revisión

*D. C. Naspirán-Joja*<sup>1</sup>, *A. G. Fajardo-Rosero*<sup>2\*</sup>, *M. Ueno-Fukura*<sup>3</sup>,  
*L. F. Collazos-Lasso*<sup>4\*</sup>

*Recibido: 14 de septiembre de 2020. Aprobado: 17 de agosto de 2021*

### RESUMEN

La acuicultura tradicional se enfrenta a serios problemas medioambientales, particularmente por el uso de grandes volúmenes de agua, con las consecuentes descargas de efluentes ricos en nutrientes inorgánicos y partículas orgánicas. Un ejemplo claro de esto está en que del 20 al 30% del nitrógeno presente en la proteína del alimento suministrado es aprovechado por los peces, el restante 70-80% es desechado en el cuerpo de agua producto de la excreción y el alimento no consumido, lo que favorece la eutrofización de aguas receptoras y su entorno. Por lo anterior, se requiere el desarrollo de tecnologías y prácticas de producción innovadoras, responsables, sostenibles y rentables. Una de las alternativas que está generando interés, debido a sus implicaciones ambientales, económicas y sociales, es la producción en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (IMTA). Este concepto se basa en la integración de diferentes niveles tróficos en un mismo sistema, lo que resulta en una conversión de los residuos de cultivo de unas especies en alimentos o fertilización para otras especies. Aplicada, la producción IMTA puede mejorar la sostenibilidad de la acuicultura al reducir el impacto de los efluentes y generar mayor rentabilidad económica, debido a la producción simultánea de dos o más productos finales y al uso mínimo de fertilizantes. El objetivo de la presente revisión es presentar los fundamentos básicos de los sistemas de IMTA, como una alternativa a los sistemas de producción en piscicultura.

**Palabras clave:** IMTA, nutrientes, organismos, producción, sostenibilidad, acuicultura.

### Prospects for sustainable production in integrated multitrophic aquaculture (IMTA): a review

#### ABSTRACT

Traditional aquaculture faces serious environmental problems, particularly due to the use of large volumes of water, with the consequent discharge of effluents rich in inorganic nutrients and organic particles. A clear example of this is that only 20 to 30% of the

<sup>1</sup> Universidad de Nariño, programa de Ingeniería en Producción Acuícola. Torobajo, calle 18, carrera 50. San Juan de Pasto, Nariño (Colombia).

<sup>2</sup> Universidad de Nariño, programa de Ingeniería en Producción Acuícola. Torobajo, calle 18, carrera 50. San Juan de Pasto, Nariño (Colombia). [diana.2305@hotmail.com](mailto:diana.2305@hotmail.com)

<sup>3</sup> Grupo de investigación IALL, Instituto de acuicultura de los Llanos, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (FCARN), Universidad de los Llanos, Km 12, vía Puerto López, sede Barcelona, Villavicencio, Meta (Colombia).

<sup>4</sup> Grupo de investigación IALL, Instituto de acuicultura de los Llanos, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (FCARN), Universidad de los Llanos, Km 12, vía Puerto López, sede Barcelona, Villavicencio, Meta (Colombia). [lcollazos@unillanos.edu.co](mailto:lcollazos@unillanos.edu.co)

nitrogen present in the protein of the supplied food is used by the fish. The remaining 70 to 80% is disposed of in the water body as a result of excretion and unconsumed food, favoring the eutrophication of receiving waters and their environment. Therefore, the development of innovative, responsible, sustainable, and profitable technologies and production practices is required. One of the alternatives that is generating interest due to its environmental, economic, and social implications is the production in integrated multitrophic aquaculture systems (IMTA). This concept is based on the integration of different trophic levels in the same system, which results in a conversion of the culture residues of some species into food or fertilization for other species. Applied, the IMTA systems can improve the sustainability of aquaculture by reducing the impact of effluents, generating greater economic profitability due to the simultaneous production of two or more end products and minimal use of fertilizers. The objective of this review is to present fundamentals basic aspects of IMTA systems, as an alternative to fish farming production systems.

**Keywords:** IMTA, nutrients, organisms, production, sustainability, aquaculture.

## INTRODUCCIÓN

La pesca y la acuicultura son una importante fuente de alimentos, nutrición e ingresos y un significativo medio de vida para cientos de millones de personas en todo el mundo. Se estima que la producción total ha alcanzado unos 179.000.000 t en 2018, con un valor total de primera venta estimado de 401.000.000.000 USD. De esta cantidad, 82.000.000 t, con un valor de 250.000.000.000 USD, procedieron de la acuicultura (FAO 2020). La expansión del consumo obedece no solo a un intenso crecimiento de la acuicultura, sino también a una combinación de muchos otros factores, por ejemplo, el fomento de los canales de distribución; la demanda cada vez mayor, asociada al crecimiento demográfico; y el aumento de los ingresos y la urbanización. A las anteriores condiciones, se suma el comercio internacional, que también ha cumplido una función importante al ofrecer mayores alternativas a los consumidores (FAO 2018).

Cabe resaltar que la acuicultura es la principal fuente de cultivo de plantas acuáticas comestibles, ya que representó

un 96% de la producción en 2016. En la actualidad, en las hojas de balance de alimentos de la FAO para el pescado y los productos pesqueros no se incluyen las algas marinas ni otras algas; sin embargo, son importantes para varias culturas, en particular en Asia oriental (FAO 2018).

En cuanto al consumo de pescado, este representó en el 2017 el 17% de la ingesta de proteínas animales de la población mundial y el 7% de todas las proteínas consumidas (FAO 2020). Además de ser una fuente rica en proteínas de alta calidad y de fácil digestión que contiene todos los aminoácidos indispensables, el pescado proporciona grasas esenciales (por ejemplo, ácidos grasos omega 3 de cadena larga), vitaminas (D, A y B) y minerales (como calcio, yodo, zinc, hierro y selenio) (FAO 2016).

El aumento de la producción, en especial de la piscicultura, ha llevado a un incremento en el deterioro del agua y los ecosistemas acuáticos, principalmente por la descarga de nutrientes (alimento no consumido y heces) y algunos productos farmacéuticos (Avnimelech 2015), lo

que ha generado gran alarma, dado que la descarga permanente de compuestos orgánicos e inorgánicos en altas concentraciones puede alterar el equilibrio biológico y químico de los ambientes naturales (Martínez-Córdova *et al.* 2010). El metabolismo del alimento ingerido termina con la formación de amonio ionizado y no ionizado que es excretado principalmente por las branquias al agua. A la suma de estas formas de amonio ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) se le denomina nitrógeno amoniacal total (NAT). En el cultivo de peces la forma no ionizada ( $\text{NH}_3$ ) es altamente tóxica y la concentración letal varía entre especies en un rango de 1-2 mg/L, agudizándose cuando la concentración de oxígeno es baja (Avnimelech 2009), el aumento del amonio no ionizado ( $\text{NH}_3$ ) depende también del aumento del pH, de la temperatura y de la salinidad (Ebeling *et al.* 2006; Timmons *et al.* 2002).

En este sentido, el sector acuícola necesita desarrollar tecnologías y prácticas innovadoras, responsables, sostenibles y rentables, con mejores prácticas de manejo y apreciación de productos diferenciados y seguros (Chopin 2013).

El sistema de IMTA es un modelo que integra diferentes niveles tróficos en el mismo sistema, lo que resulta en una conversión de los residuos del cultivo de unas especies en alimentos o fertilizantes para las otras especies. Este concepto puede mejorar la sostenibilidad de la acuicultura al reducir los efluentes y favorecer la economía, pues produce otras especies con valor agregado (Chopin *et al.* 2001). IMTA se refiere al cultivo más intensivo de diferentes especies cercanas entre sí (no necesariamente de igual nivel trófico), conectadas por transferencia de nutrientes y energía a través del agua (Barrington *et al.* 2009).

Estos sistemas de producción se pueden aplicar en aguas abiertas o sistemas terrestres, marinos o de agua dulce, y templados o tropicales. Lo importante es que los organismos apropiados se elijan en múltiples niveles tróficos en función de la complementariedad (Chopin 2013). Esta revisión tiene como objetivo recopilar información sobre los sistemas de IMTA como un modelo de producción para gestionar mejor los ambientes marinos, salobres o de agua dulce en beneficio de la humanidad y el ecosistema.

### **Generalidades de los sistemas de acuicultura multitrófica integrada (IMTA)**

Lo que comúnmente se aborda como desecho es, en realidad, materia prima biológica o nutrientes que pueden ser utilizados por organismos de un nivel trófico diferente, tratando en alguna medida el impacto ambiental propio del cultivo principal, a partir de un cultivo secundario (Barrington *et al.* 2009; Chopin 2006).

Actualmente, no hay un sector de producción de alimentos completamente sostenible desde un punto de vista energético y de biodiversidad, la mayoría requieren energía y agua, pero también generan residuos (Troell *et al.* 2017; Diana 2009). No obstante, existen métodos de cultivo más sostenibles que otros. Por ejemplo, cultivar más de una especie en la misma agua es a menudo mejor que los monocultivos, pero los policultivos, a pesar del aumento de los márgenes rentables, debido a la diversificación de productos y la reducción de riesgo (Chopin *et al.* 2012), no mitigan algunos impactos ambientales asociados con la acuicultura a gran escala.

Tener una alta producción de una especie deja a una empresa vulnerable, debido a problemas de sostenibilidad

como los precios fluctuantes del mercado y la posibilidad de destrucción del único cultivo (por enfermedades o condiciones climáticas perjudiciales). Por consiguiente, la diversificación de la industria acuícola es recomendable para reducir el riesgo económico, mantener la sostenibilidad y competitividad (Chopin 2013).

Un modelo de cultivo que ofrece ventajas es el sistema de acuicultura multitrófica integrada, el cual incluye especies de diferentes niveles tróficos, disminuyendo las preocupaciones ambientales de la acuicultura convencional, al tiempo que ofrece beneficios económicos (Kleitou *et al.* 2018; Granada *et al.* 2016; FAO 2014; Troell *et al.* 2003). Las ventajas de estos sistemas de producción incluyen el uso reducido de agua, de modo que el establecimiento en lugares donde el recurso hídrico es limitado puede llevarse a cabo (Prinsloo y Schoonbee 1993), con mayor rentabilidad económica por metro cúbico de agua, debido a la producción simultánea de dos o más productos finales (McIntosh y Fitzsimmons 2003; Silva-Castro *et al.* 2006); el uso mínimo de fertilizantes en la agricultura, debido a los aportes de nutrientes de efluentes de la acuicultura (Fernando y Halwart 2000); el menor impacto ambiental por el aprovechamiento del agua rica en nutrientes (Billard y Servin-Reyssac 1992; Silva-Castro *et al.* 2006); y la posibilidad de establecerlo en zonas menos favorecidas, como empresas familiares o de subsistencia.

Un aspecto importante es que los organismos son elegidos de acuerdo con sus funciones en el ecosistema. La idea detrás del IMTA es que, además de la sostenibilidad ambiental, estos sistemas puedan proporcionar diversificación. Cada especie actúa no solo como biofiltros naturales, sino que también tiene su propio valor

comercial, aumentando el valor global de la acuicultura (Barrington *et al.* 2009; Chopin 2006; Granada *et al.* 2016; Troell *et al.* 2009). El sistema debe incluir, aparte de una especie principal como peces o camarones, especies secundarias filtradoras capaces de retener y consumir las pequeñas partículas de materia orgánica suspendidas, lo que optimiza los rendimientos con la diversificación de productos (Barrington *et al.* 2009; Cubillo *et al.* 2016; Granada *et al.* 2016; Ren *et al.* 2012). Es importante tener en cuenta la densidad, la naturaleza y los ciclos estacionales de todas las especies involucradas, bajo el riesgo de inanición de las especies secundarias en el caso de ciclos asincrónicos (Granada *et al.* 2016; Ren *et al.* 2012).

### **Organismos cultivados en sistemas IMTA**

Para el año 2018, los peces encabezaron la producción de animales acuáticos (54.300.000 t), seguido por los moluscos (17.700.000 t, principalmente bivalvos), crustáceos (9.400.000 t), invertebrados marinos (435.400 t), tortugas acuáticas (370.000 t) y ranas (131.300 t). La producción mundial de algas acuáticas cultivadas, dominada por las algas marinas, experimentó un crecimiento relativamente bajo en los últimos años. Este cambio se debió, principalmente, al lento crecimiento de la producción de especies de algas marinas tropicales y a la reducción de la producción en Asia suroriental, mientras que la producción de algas marinas de especies de aguas templadas y frías sigue aumentando (FAO 2020).

En los últimos años, la integración de algas con el cultivo de peces marinos ha sido estudiada en Canadá, Japón, Chile, Nueva Zelanda, Escocia y Estados Unidos. La integración de mejillones y ostras como

biofiltros en el cultivo de peces se ha estudiado en varios países incluyendo Australia, Estados Unidos, Canadá, Francia, Chile y España. Además, la reciente reubicación en alta mar de muchas granjas para el cultivo de peces costeros en Turquía ha provocado el interés en estudiar los IMTA (Troell *et al.* 2009).

El uso de organismos que se alimentan por filtración (extractores de nutrientes orgánicos e inorgánicos) ha demostrado ser una alternativa válida para la biorremediación de nutrientes. Frecuentemente, se ha probado con moluscos que filtran partículas orgánicas, fitoplancton y macroalgas, que tienen la capacidad de absorción de nutrientes inorgánicos (Marinho-Soriano *et al.* 2011). No obstante, existen serias preocupaciones relacionadas con el uso de especies de extracción cultivadas en sistemas IMTA. Las características atractivas pueden representar al mismo tiempo un inconveniente, debido a la capacidad de filtración de estos organismos. Pueden también acumular sustancias diferentes a nutrientes, incluidos contaminantes como metales y productos farmacéuticos (Álvarez-Muñoz *et al.* 2015; Kümmerer 2009a; Leston *et al.* 2016).

La complejidad y diversificación de los sistemas IMTA han sido recientemente discutidas por varios autores, destacando necesidades y desafíos (Martínez-Espiñeira *et al.* 2015; Park *et al.* 2018; Kleitou *et al.* 2018; Knowler *et al.* 2020). En muchos casos, la gestión de los sistemas (recirculación o caudales, tiempos de residencia del agua) y el comportamiento, alimentación y excreción de nutrientes de los organismos involucrados (diurnos o nocturnos) influirán en la integración exitosa de los organismos (Cubillo *et al.* 2016; Zamora *et al.* 2018; Zamora & Jeffs 2012; 2011).

### **Macroalgas**

Las algas marinas (macroalgas) son productores primarios que representan un papel importante dentro del ecosistema mediante la conversión de formas inorgánicas de energía en biomasa, que luego son transferidas a los niveles más altos de la red trófica (Leston *et al.* 2011; Torres *et al.* 2008). La alta relación de área superficial/volumen y la alta afinidad por los nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, favorecen una rápida absorción de nutrientes, traducida en aumento de las tasas de crecimiento y producción, lo que lleva a una gran acumulación de biomasa (Leston *et al.* 2011; Neori *et al.* 2004). Las algas, particularmente las algas marinas, son las más adecuadas para biofiltración porque probablemente tienen la mayor productividad de todas las plantas y pueden cultivarse económicamente (Neori *et al.* 2004).

En algunos países, especialmente en Asia oriental y suroriental, las algas son una parte importante de la dieta humana (con un enfoque en *Undaria pinnatifida*, *Porphyra* spp. y *Caulerpa* spp.) y se están convirtiendo rápidamente en una tendencia mundial (FAO 2018; Fleurence 1999; Maehre *et al.* 2014; Paiva *et al.* 2014). Recientemente, la producción mundial de algas marinas ha mostrado un gran crecimiento en muchos países, debido a su potencial aplicación en varias industrias, como la medicinal, la cosmética, la de tratamiento de agua, la de alimentos y la de biocombustibles (FAO 2020).

La acuicultura ha sido una de las aplicaciones más potenciales de las algas cultivadas, propuestas como fuente alternativa de nutrientes debido a su sostenibilidad y aceptabilidad en alimentos acuícolas (Wan *et al.* 2018). Varios estudios han informado de los beneficios del uso de algas marinas

como ingredientes o aditivos alimentarios, principalmente por sus propiedades nutricionales, inmunomoduladoras, antivirales, propiedades antibacterianas y promotoras del crecimiento (Corral-Rosales *et al.* 2019; Schleder *et al.* 2018; 2020).

Es importante mencionar que las algas se han empleado con frecuencia en sistemas IMTA, mejorando el ciclo de nutrientes y la seguridad ambiental (Fleurence *et al.* 2012; Ratcliff *et al.* 2016). Además, las algas cultivadas en estos sistemas tienen un gran potencial como aditivo alimentario en dietas para peces. En este sentido, Chamorro-Legarda *et al.* (2021) evaluaron el efecto de la suplementación dietética con *Ulva fasciata* cultivada en un sistema de IMTA, observando variables como crecimiento, parámetros hematológicos y composición del tejido muscular de peces juveniles de *Seriola dorsalis*, los resultados muestran que la inclusión de diferentes niveles de harina de *U. fasciata* (5, 10 y 20 g/kg) en la formulación de las dietas, no incidió sobre el crecimiento de los peces, pero sí evidenció diferencias en los parámetros hematológicos y calidad del tejido muscular de los peces (concentración de hematocrito y contenido de ácido docosahexaenoico DHA, respectivamente), respuestas directas y proporcionales a la inclusión de la harina de la macroalga en la dieta suministrada, probablemente asociadas a los compuestos antioxidantes contenidos en *U. fasciata* como los carotenoides (Peña-Rodríguez *et al.* 2011).

Una característica interesante de las especies *Ulva* es que pueden modificar su perfil de ácidos grasos en función de la variación de los parámetros del entorno (McCauley *et al.* 2016; Moreira *et al.* 2020; Schmid *et al.* 2018). A esta condición se puede atribuir la mejor calidad nutricional del alga cultivada en un sistema de IMTA

en comparación con las algas que se encuentran en el medio silvestre.

### **Invertebrados**

Las especies de invertebrados utilizadas en IMTA deben tener simultáneamente la capacidad eficiente de eliminación de nutrientes y un valor económico intrínseco. En acuicultura tradicional, el número de especies de invertebrados en producción es sustancial: la FAO informa al menos 109 moluscos, 64 crustáceos y 9 especies de diferentes grupos taxonómicos en producción durante 2016 (FAO 2018). Algunas especies de invertebrados no tienen gran acogida en el consumo humano; sin embargo, pueden incorporarse como alimento para especies primarias (Kibria y Haque 2018) y, por lo tanto, hacer parte de un ciclo de retroalimentación de nutrientes y energía. Esto se traduce en varias ventajas económicas, como la reducción del costo de alimentación y la reducción de la carga de materia orgánica.

Cortes-Useche *et al.* (2011) evaluaron la efectividad de los erizos de mar *Echinometra lucunter* y *Lytechinus variegatus* como controladores biológicos del *fouling* en un cultivo piloto del pectínido *Nodipecten nodosus*. Los resultados de este estudio señalan los beneficios de la reducción del *fouling* de los sistemas y artes de cultivo, así como sobre los bivalvos, lo que conllevó un aumento de crecimiento, calidad y supervivencia de las especies cultivadas, beneficios que pueden ayudar a reducir el tiempo de cultivo y, así, moderar los costos de producción.

La función anti-*fouling* es una alternativa ecológica cuyo objetivo es el de impedir el crecimiento y la proliferación de organismos vivos marinos que se adhieren y crecen sobre objetos inertes sumergidos, lo que conlleva un deterioro progresivo de los sistemas de cultivo, una menor

disponibilidad de alimento para los bivalvos cultivados al colmatarse las mallas de los sistemas, y una mayor presencia de organismos (algunos depredadores: cangrejos, gasterópodos) que entran en fase larvaria y crecen dentro del arte de cultivo (Lodeiros y García 2004).

Por otra parte, los pepinos de mar pueden asimilar los desechos de las piscifactorías y pueden lograr altas tasas de crecimiento y supervivencia cuando se cocultivan con peces (Cook y Kelly 2007; Hannah *et al.* 2013; Lamprianidou *et al.* 2015; Ren *et al.* 2012; Yu *et al.* 2014). Si se cultiva con una densidad óptima debajo de las jaulas para peces, los pepinos de mar pueden eliminar hasta el 70% de partículas grandes de las jaulas (Ren *et al.* 2012).

Por lo anterior, los erizos de mar tienen el potencial para disminuir los impactos de la acuicultura de bivalvos (Slater y Carton 2009). Otras especies de erizos de mar que pueden presentar un potencial similar son *Echinometra lucunter*, *Loxechinus albus*, *Lytechinus variegatus*, *Paracentrotus lividus*, *Psammechinus miliaris* y *Apostichopus japonicus* que es una de las principales especies de acuicultura en Corea y China (Yang *et al.* 2015).

En otro estudio Nelson *et al.* (2012) evaluaron la capacidad del pepino de mar *Cucumaria frondosa* para eliminar partículas de residuos orgánicos. Los resultados demostraron que *C. frondosa* presenta alta eficiencia de absorción (> 80%), eliminando cantidades sustanciales de materia orgánica, carbono y nitrógeno que resultan de la producción de pescado. Por lo tanto, esta especie posee un gran potencial para convertirse en una especie secundaria efectiva en IMTA.

Nobre *et al.* (2010) también informaron beneficios ecológicos y económicos de un sistema de IMTA con abulón y algas

marinas en comparación al monocultivo de abulón. Los resultados indicaron que el sistema de IMTA mejoró el crecimiento de las especies extractivas cuando existe una alta concentración de nutrientes disponibles (por ejemplo, adyacente a una granja de peces) (Chopin *et al.* 2008; Ridler *et al.* 2007; Wang *et al.* 2014). Los impactos ambientales y económicos positivos se atribuyen principalmente a que el cultivo de algas en el efluente de abulón permite la recirculación de agua y reduce la descarga de nutrientes en el medioambiente (Robertson-Andersson 2007). El mejor crecimiento y desarrollo del abulón se debe a que las algas son el alimento natural de esta especie.

### **Crustáceos**

Algunos grupos de crustáceos son muy valorados y pueden ser producidos intensivamente en acuicultura. Sin embargo, generalmente, su producción depende de alimento artificial y, por lo tanto, en la IMTA, generalmente se consideran especies primarias (Chopin 2015; FAO 2009b). Algunas especies de crustáceos cultivados con éxito en los sistemas de IMTA son camarones, cangrejos y langostas.

Algunas especies de crustáceos ya se cultivan en estanques tradicionales con policultivo en Indonesia y en el sudeste asiático (camarones como el *Litopenaeus vannamei*, *P. stylirostris*, *P. monodon* o cangrejos como *Scylla* sp.). A estos, se suman especies que también tienen un alto potencial para su uso en IMTA: *Panulirus* sp., *Homarus americanus* y *H. gammarus* (FAO 2009b).

Los efluentes de la camaronicultura han sido probados en el riego de plantas, como el arroz en Tailandia (Flaherty *et al.* 2000), olivos en los Estados Unidos (McIntosh y Fitzsimmons 2003), melón

y forraje en Brasil (Miranda *et al.* 2008). De esta manera se ha demostrado el potencial que tiene el efluente del cultivo de camarones para su uso en riego agrícola. La integración de la producción de camarones con tilapia (López-Gómez *et al.* 2017) y vegetales, como sarcocornia (*Sarcocornina ambigua*) (Pinhero *et al.* 2017) y tomate (*Lycopersicon esculentum*) (Mariscal-Legarda *et al.* 2012), ha demostrado ser beneficiosa, aumentando el rendimiento del sistema.

El cultivo integrado de camarones y lisas (*Mugil liza*) en sistemas con Biofloc (BFT) ha demostrado tener éxito en la producción y calidad del agua (Melo *et al.* 2016). El género *Mugil* tiene potencial para sistemas de cultivo integrados, ya que se alimenta en el nivel trófico más bajo (detritos, microorganismos, agregado de algas, bacterias, ciliados, rotíferos, nemátodos) de la superficie de sustratos como rocas o plantas (FAO 2006-2018; Lupatsch *et al.* 2003; Mondal *et al.* 2015; Odum 1970; Rao y Badu 2013).

En estudios realizados sobre la integración de camarón blanco, con tilapia (*Oreochromis niloticus*) y cultivo de sarcocornia (*S. ambigua*) en BFT se obtuvo que el rendimiento total del sistema aumentó con la integración multitrófica de estas especies ( $4,83 \pm 0,19 \text{ kg/m}^3$ ). Sin embargo, la presencia de sarcocornia no afectó la concentración del nitrógeno y recuperación de fósforo, a pesar de reducir la cantidad de nitrato (Poli *et al.* 2019).

### **Bivalvos**

Son organismos filtradores de partículas orgánicas, y los más probados en los sistemas de IMTA (Granada *et al.* 2016). Cuando se cultivan en la misma zona con especies que reciben alimento artificial, son capaces aprovechar materiales de desecho,

disminuyendo de esta manera el exceso de nutrientes del medio (FAO 2020). Varios estudios han demostrado que los bivalvos pueden ser potenciales biocontroladores para efluentes de piscifactorías y para otras fuentes de eutrofización, ejemplo de esto es lo reportado por Soto y Mena (1999), quienes evidencian la capacidad del mejillón de agua dulce (*Diplodon chilensis*) para reducir las concentraciones de clorofila a, fosfato y amoníaco en cultivos de salmón en tanques. Otro estudio presentado por MacDonald *et al.* (2011) demuestra la eficacia de la ostra *Saccostrea commercialis* para reducir las concentraciones de sólidos totales suspendidos, nitrógeno total y fósforo total. Algunos autores han reportado tasas significativamente mejoradas de mariscos, como ostras y mejillones, cuando se mantienen junto con el cultivo de salmón (Handá *et al.* 2012; Lander *et al.* 2013).

Algunas especies de moluscos propias de los sistemas de IMTA son mejillones del género (Mytilidae) como *Mytilus edulis* o *Mytilus trossulus*. Estas especies son particularmente efectivas en áreas costeras templadas y presentan alto potencial para ser utilizados como especies secundarias en la IMTA (Ren *et al.* 2012; Sarà *et al.* 2009). Otras especies de bivalvos que presentan potencial para ser cultivadas en sistemas multitróficos incluyen géneros como *Haliotis*, *Pecten*, *Argopecten*, *Placopecten*, *Chloromytilus* o *Tapes* (FAO 2009b).

Reid *et al.* (2010) probaron la eficiencia de mejillones azules *Mytilus edulis* y *M. trossulus*, en la absorción del alimento no consumido y partículas fecales del cultivo de salmón del atlántico (*Salmo salar*). Obtuvieron resultados que favorecen el concepto de cultivar estos organismos cerca de jaulas de salmón en sistemas de IMTA como un proceso para controlar los residuos sólidos, lo que podría representar

una fuente importante para especies extractivas secundarias. Teniendo en cuenta que la alimentación corresponde a cerca del 60% de los gastos de operación de la acuicultura (Chopin *et al.* 2012), cualquier reducción y recuperación de desechos es altamente deseable, tanto por razones ambientales como económicas.

Por lo anterior, es razonable considerar que los bivalvos se pueden integrar con la piscicultura para reducir los impactos ecológicos al tiempo que tienen el potencial de convertirse en un cultivo secundario valioso para los acuicultores (MacDonald *et al.* 2011).

### **Poliquetos**

Los poliquetos anélidos presentan un interés reducido para la nutrición humana, pero su potencial económico puede ser atribuido al uso de aficionados a los acuarios como ornamentales (FAO 2009b; Ganada *et al.* 2016). También pueden representar una fuente de alimento para especies primarias en acuicultura, mientras que algunos se usan comúnmente como cebo en pesquerías (Brown *et al.* 2011; FAO 2009b).

La eficiencia de biofiltración de estos poliquetos está influenciada por el flujo de agua, las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST), el tiempo de almacenamiento y la densidad, factores que pueden afectar la supervivencia y crecimiento de los organismos (Palmer 2010).

El poliqueto *Sabella spallanzanni* mostró capacidad de filtrar, acumular y eliminar residuos bacterianos, incluyendo patógenos y vibrios potenciales en humanos (Stabili *et al.* 2010). Licciano *et al.* (2005) calcularon las tasas de depuración y la eficiencia de filtración de *S. spallanzanni* en el *Vibrio alginolyticus*, con

lo cual se pudo evidenciar la capacidad y alta eficiencia de los sabélidos para filtrar bacterias. Por lo tanto, los sabélidos se consideran aptos para su uso en granjas acuícolas como biofiltros y como actores en la eliminación de sólidos suspendidos en aguas residuales.

Sin embargo, el uso de estos organismos en la IMTA aún no está completamente implementado. Aún se desarrollan actividades de investigación y desarrollo tecnológico en este campo, aunque es claro su potencial para la producción acuícola en cuanto, al equilibrio ambiental y sostenibilidad, a partir de las funciones ecológicas de biofiltración y la remoción de sedimentos (Brown *et al.* 2011; Granada *et al.* 2016).

### **Espojas**

Estudios realizados demuestran la capacidad de *Demospiongiae* (Porifera) para filtrar selectivamente partículas orgánicas en rango de tamaño de 0,1-50 mm, las cuales incluyen bacterias heterotróficas, eucariotas, fitoplancton y detritus presentes en la columna de agua. Esta retiene hasta el 80% de las partículas suspendidas (Stabili *et al.* 2006). Por lo tanto, el cultivo de esponjas a gran escala podría tener un efecto positivo en la calidad del agua de los efluentes piscícolas. Al mismo tiempo, se estimula el crecimiento de la esponja, lo que hace que este cultivo sea más eficiente.

Algunos ejemplos de especies ya probadas y con potencial comprobado para la IMTA son *Dysidea avara*, *Chondrosia reniformis*, *Chondrilla nucula* y *Spongia officinalis*. Todas mostraron potencial de filtración y mayor crecimiento cuando se cultivan en integración con cultivos que incluyen organismos marinos (Granada *et al.* 2016).

## Aplicaciones de la IMTA con otros sistemas de cultivo

### **Acuaponía en sistemas de acuicultura multitrófica integrada**

La acuaponía consiste en una integración de sistemas de recirculación acuícola con hidroponía (producción de plantas en solución rica en nutrientes), en la que el agua se recircula eficientemente para la máxima asimilación de nutrientes para las plantas (Rakocy 2012; Tyson *et al.* 2011). Esto es posible por la relación simbiótica entre los organismos acuáticos, las bacterias y las plantas (Liang y Chien 2013), en la cual los nutrientes residuales del cultivo de peces son transformados naturalmente por las bacterias en productos que pueden ser absorbidos por las plantas, por lo tanto, benefician tanto el crecimiento vegetal como la calidad del agua (Endut *et al.* 2010; Moya *et al.* 2014; Rakocy 2012). Adicionalmente los sistemas de acuaponía pueden convertirse en un medio adicional para abordar el desafío global del suministro de alimentos (FAO 2016).

Plantas como flores, frutas y hierbas se cultivan en sistemas acuapónicos (Al-Hafedh *et al.* 2008; Love *et al.* 2015). Además, la producción de hortalizas de hoja como la lechuga (*Lactuca sativa*) se está expandiendo con buena aceptación en el mercado (Diver 2006; Rakocy 2012). Los usos de los sistemas Biofloc y acuaponía están ayudando en el aumento de la producción acuícola, partiendo de elementos como el uso eficiente de los recursos mediante la integración de sistemas de producción de alimentos y la reducción de insumos y desechos.

En cultivos con baja salinidad, los efluentes se pueden reutilizar como fuente de nutrientes para cultivar plantas como tomates (Mariscal-Lagarda y Páez-Osuna

2012), mientras que, en ambientes salinos, los efluentes se pueden usar en sistemas acuapónicos con plantas halófitas (Pinheiro *et al.* 2017). En este contexto las plantas halófitas son conocidas por haber sido cultivadas en áreas donde la concentración de sal sería letal para la mayoría de las especies vegetales (Flowers y Colmer 2008). Estas plantas crecen sobre manglares y marismas (pantano), y en Brasil hay una ocurrencia de especies como *Sarcocornia ambigua* (sinónimo de *Salicornia gaudichaudiana*) (Alonso y Crespo 2008; Costa *et al.* 2006). Esta especie vegetal ha ganado valor comercial no solo por su sabor, sino también por su alto valor nutricional en términos de minerales y compuestos bioactivos, como los fenólicos (Bertin *et al.* 2014; Ventura y Sagi 2013).

Otra planta que ha ganado un importante lugar en el mercado por sus propiedades antioxidantes es la albahaca (*Ocimum basilicum*). En cuanto a su producción en sistemas acuapónicos, es importante destacar el estudio realizado por Fierro-Sañudo *et al.* (2018), en el cual se integra con el cultivo de camarón blanco, usando dos tipos de agua de baja salinidad: con agua de mar diluida con agua de pozo, y un control en el que las plantas fueron irrigadas con una solución hidropónica nutritiva. Los autores reportan que el rendimiento del camarón fue mayor en el sistema acuapónico irrigado con agua de pozo ( $0,63 \pm 0,01 \text{ kg/m}^2$ ), y menor en el sistema irrigado con agua de mar diluida ( $0,53 \pm 0,02 \text{ kg/m}^2$ ). En cuanto a la albahaca, el mayor rendimiento se reportó en el sistema control ( $9,22 \pm 0,42 \text{ kg/m}^2$ ), seguido del agua de pozo ( $8,49 \pm 0,61 \text{ kg/m}^2$ ) y del sistema con agua de mar diluida ( $6,73 \pm 0,28 \text{ g/m}^2$ ). Cabe resaltar que el cultivo

integrado camarón-albahaca se constituye a futuro en una alternativa económica favorable y amigable con el ambiente.

Por otra parte, Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) plantean la viabilidad de integrar el efluente de las granjas de cultivo de camarón con el cultivo de tomates. Para ello, evaluaron el efecto de tres fuentes de agua con baja salinidad sobre el crecimiento y productividad de las plantas de tomate: 1) efluente de los tanques de cultivo de camarón blanco, 2) solución hidropónica nutritiva preparada para tomates y 3) agua obtenida directamente de pozo subterráneo (0,65 g/L de salinidad), suplementado con KCl y MgNO<sub>3</sub>. La densidad de siembra de camarón fue de 50 poslarvas por m<sup>2</sup> junto con 15 plantas por tanque de camarón (4,9 plantas/m<sup>2</sup>). Los resultados indican que la productividad y el factor de conversión para el camarón fueron similares a los obtenidos en las granjas de monocultivo de camarón. En cuanto a los tomates integrados con el efluente del cultivo de camarón, el rendimiento fue de 33,3 ± 2,1 kg en las 45 plantas, similar al tratamiento con solución nutritiva (35,7 ± 1,7 kg), y significativamente mayor al tratamiento con agua subterránea (25,5 ± 2,4 kg). Estos resultados demuestran que el sistema de cultivo integrado de camarones y tomates es factible. La cantidad de agua requerida (4,7 m<sup>3</sup>) para cultivar un kilogramo de camarón bajo este modelo es menor a la requerida en los sistemas tradicionales (67-113/m<sup>3</sup>). Esta condición representa una importante ventaja en aquellas zonas en las que la disposición del recurso hídrico es limitada, y contribuye a la disminución o eliminación del impacto ambiental generado por las descargas de efluentes del cultivo de camarón.

Otras aplicaciones indican la integración de modelos acuapónicos y con

tecnología Biofloc (BFT) en sistemas de IMTA, como lo reportan Pinheiro *et al.* (2017), quienes evaluaron por un periodo de 73 días el cultivo acuapónico de la halófito *Sarcocornia ambigua* y camarón blanco comparado con un sistema sin plantas. Al finalizar el estudio, los autores reportan que la producción de *S. ambigua* en un sistema integrado con el cultivo de camarón no afecta el crecimiento y la productividad de los animales dado que no se observaron diferencias significativas entre los sistemas para los parámetros productivos de camarón analizados. En el sistema acuapónico fue posible la producción de 2 kg de plantas por cada kilogramo de camarón. En cuanto a las variables de calidad del agua, el uso de nitrógeno fue 25% más eficiente en el sistema acuapónico y la concentración de sólidos suspendidos totales fue menor (338 ± 53,9 mg/L) en comparación con el sistema sin plantas (371,3 ± 53,2 mg/L); esto, debido posiblemente a la retención de SST en las raíces de las plantas.

Para comprender aún más el uso de la BFT en acuaponía, Pinho *et al.* (2017) recogen los resultados de algunos experimentos que utilizan el efluente derivado del cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) con BFT en la producción de tres variedades de lechuga, y un sistema de recirculación de agua como control durante un periodo de 21 días. Para ello tomaron juveniles de tilapia con un peso inicial de 70 g. La densidad de siembra en cada sistema fue de 500 tilapias por tanque y 20 plantas/m<sup>2</sup>. Los resultados indicaron que en el sistema BFT se logró un mejor crecimiento de la planta de lechuga independientemente de la variedad (roja, mantequilla y crujiente) y explican que esto puede deberse a la acción de las comunidades microbianas y su papel en la productividad y reciclaje

de nutrientes. Con respecto a la variedad, la lechuga mantequilla presentó un mejor rendimiento para cada variable analizada en los dos sistemas. En el caso de los peces, la supervivencia fue superior al 95% en los dos sistemas, mientras que el crecimiento fue mayor en el sistema con Biofloc. Por lo anterior, el efluente de BFT representa una alternativa viable para la producción de acuaponía, mejorando el rendimiento de las plantas.

Con lo anterior, se aborda otra posibilidad, aplicando e integrando nuevos modelos de producción (BFT, acuaponía) en un sistema de IMTA, como se describe a continuación.

### **Sistemas de acuicultura multitrófica integrada con tecnología Biofloc (BFT)**

La BFT se basa en aprovechar los residuos de los alimentos, materia orgánica y compuestos inorgánicos tóxicos (los cuales conllevan el deterioro de la calidad del agua y el poco aprovechamiento del alimento natural), a través de microorganismos presentes en los medios acuáticos, dando condiciones de dominancia a comunidades bacterianas quimio- o fotoautótrofos y heterótrofos, resolviendo así sustancialmente los problemas de saturación de nutrientes a partir de su reciclaje (Avnimelech 2009).

Los sistemas de cultivo con BFT contribuyen a la intensificación de la producción de camarón blanco del Pacífico, utiliza altas densidades de almacenamiento y un mínimo o nulo número de recambios de agua, reduciendo considerablemente el área utilizada para la cría y también el recurso hídrico en comparación con los sistemas semiintensivos (Samocha *et al.* 2012).

En este sentido, la composición de un sistema para la producción de camarones en BFT implica diferentes niveles tróficos

de especies tolerantes a la sal y capaces de aprovechar los nutrientes. La tilapia es una especie que presenta características favorables para la integración con camarones en un sistema con Biofloc debido a su capacidad para aprovechar los nutrientes del Biofloc, así como su rusticidad y tolerancia a la sal (Avnimelech 2015; El-Sayed 2006).

Sin embargo, en el sistema con Biofloc, la cantidad de sólidos aumenta con el tiempo, llegando a límites de tolerancia para los camarones cultivados (Gaona *et al.* 2011; Schweitzer *et al.* 2013; Ray *et al.* 2010). Este exceso de sólidos debe eliminarse del sistema, debido a que una alta concentración puede ser letal para los camarones (Schweitzer *et al.* 2013).

Teniendo en cuenta estos criterios, Poli *et al.* (2019) probaron el desempeño de un sistema de IMTA aplicado a camarón blanco, tilapia nilótica y cultivo de sarcocornia con tecnología Biofloc (BFT), comparado con un tratamiento control que solo difería por la ausencia de sarcocornia. Los resultados de este estudio no muestran diferencias entre los tratamientos en el rendimiento de camarón y tilapia, pero el rendimiento total del sistema de IMTA ( $4,83 \pm 0,19 \text{ kg/m}^3$ ) fue superior al obtenido en el sistema control ( $3,99 \pm 0,045 \text{ kg/m}^3$ ). En otro estudio, realizado por Legarda *et al.* (2019), se evaluó la posibilidad de integrar el cultivo de camarón blanco con lisa en Biofloc, comparando dos tratamientos: camarones con sistema integrado con lisa (camarón+lisa) y sistema solo con camarones. La densidad de siembra en el tratamiento (camarón+lisa) fue de 250 camarones/m<sup>3</sup> y, para el caso de las lisas, 167 peces/m<sup>3</sup>. Después de 53 días de estudio el experimento mostró que la integración de juveniles de lisas con camarón incrementó la productividad en 11,9% y

la retención de fósforo en 16,8%, aumentando así la eficiencia general del sistema integrado. Además, hay una ventaja: las lisas pueden ser mantenidas en sistemas con Biofloc con alimento artificial restringido sin perjudicar su salud y crecimiento, como se observa en esta investigación, en la que los peces fueron alimentados una vez al día a razón de 1% de la biomasa inicial. Esto sugiere que los peces también consumieron los organismos presentes en el sistema con Biofloc.

Amato-Borges *et al.* (2020) sugieren que el cultivo integrado con especies del género *Mugil* es una alternativa interesante para la reducción de los sólidos generados en el cultivo de camarón blanco y de hecho es posible realizar el cultivo simultáneamente sin la necesidad de separar las especies en diferentes tanques. Algunos autores reportan que *Mugil liza* tolera concentraciones de sólidos de hasta 700 mg/L (Rocha 2012).

Un componente fundamental que vale la pena resaltar de la integración de Biofloc con la IMTA es el control y aprovechamiento de las formas del nitrógeno y los sólidos suspendidos. Los parámetros de calidad de agua son un factor importante para la IMTA, ya que de eso depende la integración de las especies dentro de un mismo cultivo. Los rangos de los parámetros varían según el tipo de cultivo, por lo cual es de gran importancia abordar estudios para conocer los diferentes valores óptimos de algunos parámetros y también técnicas para el control de estos en los sistemas de integración multitrofica.

Los parámetros que tienen mayor incidencia dentro del sistema, como ya se mencionó, son los sólidos suspendidos y los compuestos nitrogenados, que se obtiene a través del proceso de lixiviación

de heces y alimento no consumido. Estos pueden ser un factor clave que puede alterar el sistema. La baja absorción de nitrógeno es uno de los principales problemas técnicos, económicos y ambientales de la acuicultura. En promedio, solo el 25% del nitrógeno es incorporado por los animales acuáticos (Avnimelech 2015; Crab *et al.* 2007), el resto del nitrógeno se excreta en el agua en forma de amoníaco, que, a su vez, se vuelve tóxico para los organismos acuáticos. Además, el alimento representa más del 50% de los costos de producción acuícola y el nitrógeno es el ingrediente alimenticio más costoso (Perea *et al.* 2018). El fósforo, junto con el nitrógeno, también es una fuente principal de contaminantes para los ambientes acuáticos. Su recuperación en camarones es aproximadamente del 11% (Avnimelech y Ritvo 2003), mientras que el resto se excreta y deposita en ambientes adyacentes.

En relación con los sólidos suspendidos totales (SST), existen estudios en los que la cantidad de sólidos en el sistema incide en el crecimiento del animal. En un estudio realizado por Poli *et al.* (2015), se evaluó el efecto de los SST en el desempeño de las larvas de *Rhamdia quelen* evaluando tres concentraciones (200; 400-600 y 800-1000 mg/L). Se concluyó que, a una concentración de SST de 200 mg/L, se logró un mejor desarrollo de las larvas.

Teniendo en cuenta lo anterior, la integración de la IMTA con la BFT trata de aprovechar todos los productos que se generan en el sistema, a partir de la excreción de los peces y el metabolismo bacteriano por las diferentes vías (hetero- y quimioautotróficas) ya sean orgánicos e inorgánicos. En esta línea, se han realizado investigaciones como la presentada por Poli *et al.* (2019), quienes integran el cultivo de

camarón blanco con tialpia nilótica y un banco hidropónico para cultivo de *Sarcocornia ambigua* en un sistema de IMTA. En esta se realizó la comparación con un sistema control, el cual se diferenciaba por la ausencia de sarcocornia, y se obtuvo que la producción de nitrato fue menor en el sistema de IMTA ( $9,38 \pm 1,09$  mg/l) en comparación con el sistema control que fue de ( $12,28 \pm 1,27$  mg/l), debido posiblemente a la presencia de la planta halófila que presenta preferencia por la absorción de este compuesto nitrogenado, mientras que los valores obtenidos para NAT y nitrito fueron más altos en este sistema. Por otra parte, la presencia de sarcocornia en el sistema de IMTA disminuyó la producción de lodo y sólidos suspendidos totales. Esto puede explicarse por el proceso de fitorremediación del agua realizado por la sarcocornia. En otro estudio realizado por Poli *et al.* (2018), en el cual se evaluó el efecto de diferentes densidades de población de tilapia del Nilo, integradas con camarón blanco del Pacífico en Biofloc, se observó que el total de sólidos suspendidos se mantuvo dentro de los niveles indicados para ambas especies, atribuido al consumo de los sólidos por parte de los peces, lo que representa una ganancia ecológica significativa. De la misma forma se registró que se obtuvo una recuperación de nitrógeno, el cual fue mayor en los tratamientos con alta densidad de peces (27,9% de nitrógeno recuperado), lo que representa un avance económico y ambiental para camarones criados en un sistema con Biofloc.

Dentro del sistema de IMTA, el control de los sólidos se puede realizar mediante el uso de sedimentación o filtración (Cortez *et al.* 2009). Por ejemplo, en un estudio realizado por Legarda *et al.* (2020), en el que se compararon los efectos de diferen-

tes densidades de *Mugil curema* integrado con camarón blanco, se logró mantener estable la cantidad de SST, obteniendo un promedio de  $384,86 \pm 15,16$  mg/L, a pesar de que se aumentó en mayor medida el alimento. Todo esto se logró gracias al decantador de sólidos. Con respecto a los sistemas acuapónicos y su manejo de los sólidos, hay muchos tipos de filtración, el más empleado consiste en un biofiltro adicional (por ejemplo, medios o lechos de grava) a través del cual pasa el agua antes de regresar a los tanques de peces asociados con balsas flotantes (Love *et al.* 2015). Por lo general, en los sistemas de acuaponía, el recambio de agua puede reducirse, ya que las plantas absorben los nutrientes disueltos en el agua. Por otra parte, en el uso de sistemas de IMTA con Biofloc, la cantidad de SST es mayor por la presencia de floculos microbianos que sirven como alimento para peces (Avnimelech 2007). Sin embargo, una concentración óptima de SST puede diferir entre especies o etapas de desarrollo.

En cuanto a la producción de sistemas acuapónicos en tecnología Biofloc, en un estudio realizado por Rocha *et al.* (2017) se evaluó la producción de lechuga en sistemas acuapónicos con Biofloc, y se incluyó *Rhamdia quelen*. En este estudio se realizó un análisis de las bacterias presentes en el agua, en el cual se observó la presencia de bacterias heterotróficas y bacterias autotróficas en alta densidad en Biofloc que explican los valores más altos del nitrito en los tanques ( $0,224$  mg/l). Las bacterias heterotróficas logran la captura de amoníaco y su transformación en proteína microbiana, mientras que las bacterias autotróficas quimiosintéticas realizan la oxidación de amoníaco a nitrito y de nitrito a nitrato (Ebeling *et al.* 2006). Las bacterias

nitrificantes también pueden estar asociadas con sustratos presentes en el tanque o con las raíces de las plantas (Rakocy *et al.* 2006). En un estudio realizado por Pinheiro *et al.* (2019), en el que se evaluó la relación entre la salinidad en el desempeño del camarón marino y la halófito en un sistema acuapónico con Biofloc, se encontró que las concentraciones más bajas de amoníaco y nitrito, y las concentraciones más altas de nitrato estaban cerca de la salinidad de 18 ppt; por lo tanto, se concluye que esta salinidad favorece la absorción de amoníaco por las plantas, lo cual es un proceso favorable para el sistema.

## CONCLUSIONES

Los sistemas de acuicultura multitrófica integrada se constituyen en una alternativa de producción que ofrece diversas ventajas en comparación con los sistemas de producción acuícola convencionales. Entre las ventajas, cabe destacar la retención de nutrientes (N y P) como fertilizante de los vegetales, reducción o aprovechamiento de los sólidos producidos como alimento para otras especies, el uso eficiente de alimento, el uso eficiente del agua, la reducción de los efluentes, la producción de otras especies con valor agregado y la mayor productividad total a través de la integración de organismos de diferentes niveles tróficos en un mismo sistema.

Teniendo en cuenta las investigaciones y adelantos tecnológicos que se tienen acerca de sistemas IMTA, es necesario investigar otras especies, como las dulceaúcolas, especies continentales que son cultivadas en altos volúmenes con grandes recambios de agua, bajo estos modelos amigables de producción, enmarcados en conceptos de economía circular.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue realizado gracias al apoyo que brindó la Universidad de los Llanos mediante la estrategia de apoyo por parte del Instituto de Acuicultura. Los autores agradecen su apoyo y el de todos los profesores y del personal que nos brindó el respaldo y conocimiento necesario para la culminación de este trabajo.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses económicos en competencia conocidos o relaciones personales que pudieran haber parecido influir el trabajo reportado en este documento.

## FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este trabajo no recibió fondos de financiamiento de ninguna entidad.

## REFERENCIAS

- Al-Hafedh YS, Alami A, Beltagi MS. 2008. Food production and water conservation in a recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *J. World Aquacult Soc.* 39 (4):510-520. Doi: 10.1111/j.1749-7345.2008.00181.x
- Alonso MÁ, Crespo MB. 2008. Taxonomic and nomenclatural notes on South American taxa of *Sarcocornia*. (Chenopodiaceae). *Ann. Bot. Fenn.* 45:241-254. Doi: 10.5735/085.045.0401
- Álvarez D, Rodríguez S, Maulvault, AL, Tediosi A, Fernández M, Van den Heuvel F. 2015. Occurrence of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in macroalgae, bivalves, and fish from coastal areas in Europe. *Environl Res.* 143(Part B):56-64. Doi: 10.1016/j.envres.2015.09.018
- Amato BA, Rocha JL, Oliveira PH, Zacheu AC, Caio FM, Vinicius C, Vinatea LA. 2020. Integrated culture of white shrimp *Litopenaeus vannamei* and mullet *Mugil liza* on biofloc technology:

- Zootechnical performance, sludge generation, and *Vibrio* spp. Reduction. *Aquaculture*. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735234
- Avnimelech Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bioflocs technology ponds. *Aquaculture*. 264:140-147. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.11.025
- Avnimelech Y. 2009. *Biofloc Technology: A practical Guide Book*. Baton Rouge, Louisiana, USA: World Aquaculture Society.
- Avnimelech Y. 2015. *Biofloc technology: A practical Guide Book*. 3rd edition. Baton Rouge, Louisiana, USA: World Aquaculture Society.
- Avnimelech Y, Ritvo G. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. *Aquaculture* 220:549-567. Doi: 10.1016/S0044-8486(02)00641-5
- Barrington K, Chopin T & Robinson S. 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. In *Integrated mariculture: a global review*. 529:7-46.
- Bertin RL, Gonzaga LV, Borges G, Azevedo MS, Maltez HF, Heller M, Micke GA, Tavares LBB, Fett R. 2014. Nutrient composition and identification/quantification of major phenolic compounds in *Sarcocornia ambigua* (Amaranthaceae) using HPLC-ESI-MS/MS. *Food Res. Int.* 55:404-411. Doi: 10.1016/j.foodres.2013.11.036
- Billard R, Servrin J. 1992. Les impacts négatifs de la pisciculture' étang sur l'environnement. En: G Barnabe, P Kestemont, editores. *Production, Environment and Quality*. Europ. Aquaculture Soc. 18:17-29.
- Brown N, Eddy S, Plaud S. 2011. Utilization of waste from a marine recirculating fish culture system as a feed source for the polychaete worm, *Nereis virens*. *Aquaculture*. 322-323(C): 177-183. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.09.017
- Chopin T, Buschmann AH, Halling C, Troell M, Kautsky N, Neori A, Kraemer GP, Zertuche JA, Yarish C, Neefus C. 2001. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability. *J. Phycol.* 37:975-986. Doi: 10.1046/j.1529-8817.2001.01137.x
- Chopin T. 2006. *Integrated Multi-Trophic Aquaculture*. What it is and why you should care and don't confuse it with polyculture. *North. Aquaculture*. 1-2.
- Chopin T, Robinson SMC, Troell M, Neori A, Fang J. 2008. *Multitrophic Integration for Sustainable Marine Aquaculture*. En: Jorgensen SE, Fath BD, editores. *The Encyclopedia of Ecology, Ecological Engineering*. Vol. 3. Oxford: Elsevier. p. 2463-2475.
- Chopin T, Cooper JA, Reid G, Cross S, Moore C. 2012. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Aquaculture*. 4(4):209-220. Doi: 10.1111/j.1753-5131.2012.01074.x
- Chopin T. 2013. *Integrated Multi-Trophic (IMTA). Marine Fisheries Enhancement: Coming of Age in the New Millennium*. New Brunswick. 542-564 p. Doi: 10.1007/978-1-4614-5797-8\_173
- Chopin T. 2015. *Marine Aquaculture in Canada: Well-Established Monocultures of Finfish and Shellfish and an Emerging Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) Approach Including Seaweeds, Other Invertebrates, and Microbial Communities*. *Fisheries*. 40(1):28-31. Doi: 10.1080/03632415.2014.986571
- Cook EJ, Kelly MS. 2007. Enhanced production of the sea urchin *Paracentrotus lividus* in integrated open-water cultivation with Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture*. 273: 573-585. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.10.038
- Corral-Rosales C, Ricque-Marie D, Cruz-Suárez LE, Arjona O, Palacios E. 2019. Fatty acids, sterols, phenolic compounds, and carotenoid changes in response to dietary inclusion of *Ulva clathrata* in shrimp *Litopenaeus vannamei* broodstock. *J. Appl. Phycol.* 31: 4009-4020. Doi: 10.1007/s10811-019-01829-2
- Cortez GEP, Araújo JAC, Bellingeri PA, Dalri, AB. 2009. Qualidade química da água residual da criação de peixes para cultivo de alface em hidroponia. *RBEAA*. 13(4): 494-498
- Cortés C, Gómez J, Santos M. 2011. Erizos de mar como control biológico del *fouling* en un cultivo de *Nodipecten nodosus* en el área de Santa Marta, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 40(2):233-247.
- Costa CS, Armstrong R, Detres Y, Koch EW, Bertiller M, Beeskow A, Neves LS, Tourn G.M, Bianciotto OA, Pinedo LB, Blessio AY, San Roman N. 2006. Effect of ultraviolet-B radiation

- on salt marsh vegetation: trends of the genus *Salicornia* along the Americas. *Photochem. Photobiol.* 82: 878-886. Doi: 10.1562/2005-10-30-RA-729
- Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture.* 270:1-14. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.05.006
- Cubillo AM, Ferreira JG, Robinson SMC, Pearce CM, Corner RA, Johansen J. 2016. Role of deposit feeders in integrated multi-trophic aquaculture-A model analysis. *Aquaculture.* 453:54-66. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.11.031
- Diana JS. 2009. Aquaculture Production and Biodiversity Conservation. *Bioscience*, 59(1):27-38. Doi: 10.1525/bio.2009.59.1.7
- Diver S. 2006. Aquaponics-Integration of Hydroponics with Aquaculture. ATTRA National Sustainable Agriculture Information Service. NCAT. 1-25.
- Ebeling JM, Timmons MB, Bisogni JJ. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic control of ammonia-nitrogen in aquaculture production systems. *Aquaculture.* 257(1-4):346-358. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2006.03.019
- El-Sayed AFM. 2006. Tilapia Culture. Wallingford (UK): CAB International. Oceanography Department, Faculty of Science, Alexandria University, Alexandria, Egypt, Doi: 10.1079/9780851990149.0000
- Endut A, Jusoh A, Ali N, Nik WBW, Hassan A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation. *Bioresour. Technol.* 101(5):1511-1517. Doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.040
- Fernando CH, Halwart M. 2000. Possibilities for integration of fish farming into irrigation systems. *Fisheries. Manag. Ecol.* 7:45-54. Doi: 10.1046/j.1365-2400.2000.00188.x
- Fierro-Sañudo JF, Rodríguez-Montes de Oca GA, León-Cañedo JA, Alarcón-Silvas SG, Mariscal-Lagarda MM, Díaz-Valdés T, Páez-Osuna F. 2018. Production and management of shrimp (*Penaeus vannamei*) in co-culture with basil (*Ocimum basilicum*) using two sources of low-salinity water. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 46(1): 63-71.
- Flaherty M, Szuster BW, Mille P. 2000. Low salinity shrimp farming in Thailand. *Ambio.* 29: 174-179.
- Fleurence J. 1999. Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science & Technol.* 10(1):25-28. Doi: 10.1016/S0924-2244(99)000151
- Fleurence J, Morançais M, Dumay J, Decottignies P, Turpin V, Munier M, Garcia-Bueno N, Jaouen P. 2012. What are the prospects for using seaweed in human nutrition and for marine animals raised through aquaculture? *Trends Food Sci. Technol.* 27:57-61. Doi: 10.1016/j.tifs.2012.03.004
- Flowers TJ, Colmer TD. 2008. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytol.* 179:945-963. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2006-2018. Cultured Aquatic Species Information Programme. *Mugil cephalus*. Cultured Aquatic Species Information Programme. Text by Saleh, M. A. En: FAO Fisheries and Aquaculture Department [Internet, actualizado 2006, 7 abril]. Rome. [Consultado 2018, 14 de noviembre] Disponible en: [http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Mugil\\_cephalus/en](http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Mugil_cephalus/en).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009b. Integrated Mariculture: A Global Review. FAO, Fisheries and Aquaculture Technical Paper. 529:1-194.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Fisheries and Aquaculture Department. 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture, Roma: FAO. 1-243 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2016. The state of world fisheries and aquaculture. 4 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2018. The state of world fisheries and aquaculture, Contributing to Food Security and Nutrition for all. Roma: FAO. 76 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2020. The state of world fisheries and aquaculture. Roma: FAO.
- Gaona CA, Poersch LH, Krummenauer D, Foes GK, Wasielesky WJ. 2011. The effect of solids removal on water quality, growth and survival of *Litopenaeus vannamei* in a biofloc technology

- culture system. *Int. J. Recirc. Aquaculture*. 12:54-73. Doi: 10.21061/ijra.v12i1.1354
- Granada L, Sousa N, Lopes, Lemos MFL. 2016. Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges?: A review. *Rev. Aquac.* 8(3):283-300. Doi: 10.1111/raq.12093
- Handa A, Ranheim A, Olsen AJ, Altin D, Reitan KI, Olsen Y. 2012. Incorporation of salmon fish feed and feces components in mussels (*Mytilus edulis*): implications for integrated multi-trophic aquaculture in cool-temperate North Atlantic waters. *Aquaculture*. 370-371:40-53. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2012.09.030
- Hannah L, Pearce CM, Cross SF. 2013. Growth and survival of California Sea cucumbers (*Parastichopus californicus*) cultivated with sablefish (*Anoplopoma fimbria*) at an integrated multi-trophic aquaculture site. *Aquaculture*. 406-407:34-42. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.04.022
- Kibria ASM, Haque MM. 2018. Potentials of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in freshwater ponds in Bangladesh. *Aquac Reports*. 11:8-16. Doi: 10.1016/j.aqrep.2018.05.004
- Kleitou P, Kletou D, David J. 2018. Is Europe ready for integrated multi-trophic aquaculture? A survey on the perspectives of European farmers and scientists with IMTA experience. *Aquaculture*. 490:136-148. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.02.035
- Knowler D, Chopin T, Martínez-Españeira R, Neori A, Nobre A, Noce A, Reid G. 2020. The economics of integrated multi-trophic aquaculture: where are we now and where do we need to go? *Aquaculture*. 1-16. Doi: 10.1111/raq.12399
- Kümmerer K. 2009a. Antibiotics in the aquatic environment: A review-Part I. *Chemosphere*. 75(4):417-434. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.11.086
- Lamprianidou F, Telfer T, Ross L. 2015. A model for optimization of the productivity and bioremediation efficiency of marine integrated multitrophic aquaculture. *Estuar. Coast. Shelf Sci*. 164: 253-264. Doi: 10.1016/j.ecss.2015.07.045
- Lander TR, Robinson SMC, MacDonald BA, Martin JD. 2013. Characterization of the suspended organic particles released from salmon farms and their potential as a food supply for the suspension feeder, *Mytilus edulis* in integrated multitrophic aquaculture (IMTA) systems. *Aquaculture*. 406-407:160-171. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.05.001
- Legarda E, Poli MA, Martins-Aranha M, Pereira S, Martins M, Machado C, De Lorenzo M, Vieira FN. 2019. Integrated recirculating aquaculture system for mullet and shrimp using biofloc technology. *Aquaculture*. 512. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734308
- Legarda E, Aranha M, Pereira S, Siqueira, RF, Pinheiro IC, Seiffert WQ, Vieira, FN. 2020. Shrimp rearing in biofloc integrated with different mullet stocking densities. *Aquac. Res*. Doi: 10.1111 / are.14694
- Legarda E, Viana MT, Del Río Zaragoza OB, Skrzynska AK, Braga A, De Lorenzo MA, Vieira FN. 2021. Effects on fatty acids profile of *Seriola dorsalis* muscle tissue fed diets supplemented with different levels of *Ulva fasciata* from an Integration Multi-Trophic Aquaculture system. *Aquaculture*. 535: 736414. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.736265
- Leston S, Nunes M, Viegas I, Lemos MFL, Freitas A, Barbosa J. 2011. The effects of the nitrofurantoin furaltadone on *Ulva lactuca*. *Chemosphere*. 82(7):1010-1016. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.10.067
- Leston S, Freitas A, Rosa J, Barbosa J, Lemos MFL, Pardal MÂ, Ramos, F. 2016. A multi-residue approach for the simultaneous quantification of antibiotics in macroalgae by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. B*. 1033-1034:61-367. Doi: 10.1016/j.jchromb.2016.09.009
- Liang J, Chien Y. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. *Int. Biodeterior. Biodegrad*. 85:693-700. Doi: 10.1016/j.ibiod.2013.03.029
- Licciano M, Stabili L, Giangrande A. 2005. Clearance rates of *Sabella spallanzanii* and *Branchiomma luctuosum* (Annelida: Polychaeta) on a pure culture of *Vibrio alginolyticus*. *Water Res*. 39: 4375-4384. Doi: 10.1016/j.watres.2005.09.003
- Lodeiros C, García N. 2004. The use of sea urchins to control "fouling" during suspended culture of bivalves. *Aquaculture*. 231(1-4):293-298. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2003.10.022

- López C, Ponce JT, Castillo S, Puga D, Castillo LF, García M. 2017. Evaluation of two mix-cultures of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with red tilapia hybrid and spotted rose snapper (*Lutjanus guttatus*) in intensive indoor brackish water tanks. Lat. Am. J. Aquac. Res. 45:922-929. Doi: 10.3856/vol45-issue5-fulltext-7
- Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE. 2015. Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture. 435:67-74. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.023
- Lupatsch I, Katz T, Angel DL. 2003. Assessment of the removal efficiency of fish farm effluents by grey mullets: a nutritional approach. Aquac. Res. 34(15):1367-1377. Doi: 10.1111/j.1365-2109.2003.00954.x
- McCaughey JL, Meyer BJ, Winberg PC, Skropeta D. 2016. Parameters affecting the analytical profile of fatty acids in the macroalgal genus *Ulva*. Food Chem. 209: 332-340. Doi: 10.1016/j.foodchem.2016.04.039
- MacDonald BA, Robinson SMC, Barrington KA. 2011. Feeding activity of mussels (*Mytilus edulis*) held in the field at an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) site (*Salmo salar*) and exposed to fish food in the laboratory. Aquaculture. 314(1-4):244-251. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.01.045
- McIntosh RP, Fitzsimmons K. 2003. Characterization of effluent from an inland, low salinity shrimp farm: what contribution could this water make if used for irrigation. Aquac. Eng. 27(2):147-156. Doi: 10.1016/S0144-8609(02)00054-7
- Maehre HK, Malde MK, Eilertsen KE, Elvevoll EO. 2014. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed. J. Sci. Food Agric. 94(15):3281-3290. Doi:10.1002/jsfa.6681-
- Marinho E, Azevedo CAA, Trigueiro TG, Pereira DC, Carneiro MAA, Camara MR. 2011. Bioremediation of aquaculture wastewater using macroalgae and *Artemia*. Int. Biodeterior. Biodegrad. 65(1):253-257. Doi: 10.1016/j.ibiod.2010.10.001
- Mariscal MM, Páez F, Esquer JL, Guerrero I, Del Vivar AR, Félix R. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. Aquaculture. 366-367:76-84. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2012.09.003
- Martínez ER, Chopin T, Robinson S, Noce A, Knowler D, Yip W. 2015. Estimating the biomitigation benefits of integrated multi-trophic aquaculture: a contingent behavior analysis. Aquaculture. 43718: 2-194. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.09.003
- Martínez L R, Martínez M, López JA, Campaña A, Miranda A, Ballester E, Porchas MA. 2010. Natural food in aquaculture: An updated review. En: Cruz Suarez LE, Ricque-Marie D, Tapia-Salazar M, Nieto-López MG, Villarreal-Cavazos DA, Gamboa-Delgado J, editores. Memorias del X Simposio Internacional de Nutrición Acuicola, San Nicolás de los Garza, N. L., México. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, p. 668-669.
- Melo EP, Oshiro LMY, Fugimura MMS, da Costa TV, Flor HR, Sant'ana NF. 2016. Monocultivo e policultivo do camarão *Litopenaeus schmitti* e do parati *Mugil curema* em sistema de bioflocos e água clara. Boletim do Instituto de Pesca. 42, 3, 532-547. Doi: 10.20950/1678-2305.2016v42n3p532
- Miranda FR, Lima RN, Crisóstomo LA, Santana MGS. 2008. Reuse of inland low-salinity shrimp farm effluent for melon irrigation. Aquac. Eng. 39:1-5. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2008.04.001
- Mondal A, Chakravorty D, Mandal S, Bhattacharyya SB, Mitra A. 2015. Feeding ecology and prey preference of grey mullet, *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758) in extensive brackish water farming system. J Marine Sci Res Dev. 6(1): 1-5. Doi: 10.4172/2155-9910.1000178
- Moreira ASP, Costa E, Melo T, Sulpice R, Cardoso SM, Pitarma B, Pereira R, Abreu MH, Domingues P, Calado R, Domingues MR. 2020. Seasonal plasticity of the polar lipidome of *Ulva rigida* cultivated in a sustainable integrated multi-trophic aquaculture. Algal Res. 49. Doi: 10.1016/j.algal.2020.101958
- Moya EAE, Sahagún CAA, Carrillo JMM, Alpuche PJA, Álvarez CA, Martínez R. 2014.

- Herbaceous plants as part of biological filter for aquaponics system. *Aquac. Res.* 1-11. Doi: 10.1111/are. 12626
- Nelson EJ, MacDonald BA, Robinson SMC. 2012. The absorption efficiency of the suspension-feeding sea cucumber, *Cucumaria frondosa*, and its potential as an extractive integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Aquaculture.* 370-371: 19-25. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2012.09.029
- Neori A, Chopin T, Troell M, Buschmann AH, Kraemer GP, Halling C, Shpigel M, Charles Y. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture.* 231(1-4):361-391. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2003.11.015
- Nobre AM, Robertson-Andersson D, Neori A, Sankar K. 2010. Ecological-economic assessment of aquaculture options: Comparison between abalone monoculture and integrated multi-trophic aquaculture of abalone and seaweeds. *Aquaculture.* 306:116-126. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.06.002
- Odum WE. 1970. Utilization of the direct grazing and plant detritus food chains by the striped mullet *Mugil cephalus*. En: J. H. Steele, editor, *Marine food chains*. Oliver and Boyd, Edinburgh, 222-240 p.
- Paiva L, Lima E, Patarra RF, Neto AI, Baptista J. 2014. Edible Azorean macroalgae as source of rich nutrients with impact on human health. *Food Chem.* 164(C):128-135. Doi: 10.1016/j.foodchem.2014.04.119
- Palmer PJ. 2010. Polychaete-assisted sand filters. *Aquaculture.* 306(1-4):369-377. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.06.011
- Park M, Shin SK, Do YH, Yarish C, Kim JK. 2018. Application of open water integrated multi-trophic aquaculture to intensive monoculture: a review of the current status and challenges in Korea. *Aquaculture.* 497: 174-183. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.07.051
- Peña-Rodríguez A, Mawhinney TP, Ricque-Marie D, Cruz-Suárez LE. 2011. Chemical composition of cultivated seaweed *Ulva clathrata* (Roth) C. Agardh. *Food Chemistry.* 129: 491-498. Doi: 10.1016/j.foodchem.2011.04.104
- Perea Román C, Garcés Caicedo YJ, Muñoz Arboleda LS, Hoyos Concha JL, Gómez Peñaranda JA. 2018. Valoración económica del uso de ensilaje de residuos piscícolas en la alimentación de *Oreochromis* spp. *Biotecnol Sector Agropecuario Agroind.* 16(1):43-51. Doi: 10.18684/BSAA(16)43-51
- Pinheiro I, Arantes R, Espírito CM, Vieira FN, Lapa KR, Gonzaga LV, Fett R, Barcelos JL, Seiffert WQ. 2017. Production of the halophyte *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. *Ecol. Eng.* 100:261-267. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.12.024
- Pinheiro I, Siqueira RF, Vieira F do N, Valdeiro F, Fett R, Oliveira AC, Magallon FJ, Quadros SW. 2019. Aquaponic production of *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in biofloc system at different salinities. *Aquaculture.* 519. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734918
- Pinho SM, Molinari D, de Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MGC. 2017. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecol. Engin.* 103(A):146-153. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.03.009
- Prinsloo JF, Schoonbee HJ. 1993. The utilization of agricultural byproducts and treated effluent water for aquaculture in developing areas of South África. *Suid Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie*, 12(3):72-79. Doi: 10.4102/satnt.v12i3.566
- Poli MA, Schweitzer R, Nuñez APO. 2015. The use of biofloc technology in a South American catfish (*Rhamdia quelen*) hatchery: effect of suspended solids in the performance of larvae. *Aquac. Eng.* 66:17-21. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2015.01.004
- Poli MA, Legarda EC, Lorenzo MA, Martins MA, Vieira F do N. 2018. Pacific white shrimp and Nile tilapia integrated in a biofloc system under different fish-stocking densities. *Aquaculture* 498:83-89 Doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.08.045
- Poli MA, Legarda EC, Lorenzo MA, Pinheiro I, Martins MA, Quadros W, Vieira FN. 2019. Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. *Aquaculture.* 511:2-6. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734274

- Rakocy JE, Masser MP, Losoro TM. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center Publication. 454:16.
- Rakocy J.E. 2012. Aquaponics-integrating fish and plant culture. En: Tidwell JH, editor. Aquaculture Production Systems. 1.ª ed. Oxford: Wiley-Blackwell. 343-386 p.
- Rao RK, Babu KR. 2013. Studies on food and feeding habits on *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758) east coast off Andhra Pradesh, India. CJPAS. 7(3):2499-2504
- Ratcliff JJ, Wan AHL, Edwards MD, Soler-Vila A, Johnson MP, Abreu MH, Morrison L. 2016. Metal content of kelp (*Laminaria digitata*) co-cultivated with Atlantic salmon in an integrated multi-trophic aquaculture system. Aquaculture. 450: 234–243. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2015.07.032
- Ray AJ, Lewis BL, Browdy CL, Leffler JW. 2010. Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems. Aquaculture. 299(1-4):89-98. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2009.11.021
- Reid GK, Liutkus M, Bennett A, Robinson SMC, MacDonald B, Page F. 2010. Absorption efficiency of blue mussels (*Mytilus edulis* and *M. trossulus*) feeding on Atlantic salmon (*Salmo salar*) feed and fecal particulates: Implications for integrated multi-trophic aquaculture. Aquaculture. 299(1-4):165-169. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2009.12.002
- Ren JS, Stenton J, Plew DR, Fang J, Gall M. 2012. An ecosystem model for optimising production in integrated multitrophic aquaculture systems. Ecol. Model. 246:34-46. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.07.020
- Ridler N, Wowchuk M, Robinson B, Barrington K, Chopin T, Robinson S, Page F, Reid G, Szemerda M, Sewuster J, Boyne-Travis S. 2007. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA): A potential strategic choice for farmers. Aquac. Econ. Manag. 11(1): 99-110. Doi: 10.1080/13657300701202767
- Robertson-Andersson DV. 2007. Biological and economical feasibility studies of using *Ulva lactuca* (Chlorophyta) in recirculating systems in abalone farming [tesis doctoral]. Universidad de Cape Town, Sur África.
- Rocha AF. 2012. Avaliação do potencial de criação de juvenis de tainhas *Mugil hospes* e *Mugiliza* em sistema de bioflocos. [Tesis doctoral]. Brasil, Universidad Federal de Río Grande. Río Grande.
- Rocha AF, Biazetti ML, Stech MR, Silva R. 2017. Lettuce production in aquaponic and biofloc systems with silver CATFISH *Rhamdia quelen*. Bol. Inst. Pesca, São Paulo. 44: 64-73. Doi: 10.20950/1678-2305.2017.64.73
- Samocha TM, Schweitzer R, Krummenauer D, Morris TC. 2012. Recent advances in superintensive, zero-exchange shrimp raceway systems. Global Aquac. Advoc. 15:70-71.
- Sará G, Zenone A, Tomasello A. 2009. Growth of *Mytilus galloprovincialis* (mollusca, bivalvia) close to fish farms: a case of integrated multi-trophic aquaculture within the Tyrrhenian Sea. Hydrobiologia. 636(1):129-136. Doi: 10.1007/s10750-009-9942-2
- Schleder DD, Blank M, Peruch LGB, Poli MA, Gonçalves P, Rosa KV, Fracalossi, DM, Vieira FN, Andreatta ER, Hayashi L. 2018. Effect of brown seaweeds on Pacific white shrimp growth performance, gut morphology, digestive enzymes activity and resistance to white spot virus. Aquaculture. 495:359-365. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.06.020
- Schleder DD, Blank M, Peruch LGBP, Poli MA, Gonçalves P, Rosa KV, Fracalossi DM, Vieira FN, Andreatta ER, Hayashi L. 2020. Impact of combinations of brown seaweeds on shrimp gut microbiota and response to thermal shock and white spot disease. Aquaculture. 519:734-779. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734779
- Schmid M, Kraft LGK, Loos LM, Kraft GT, Virtue P, Nichols PD, Hurd CL. 2018. Southern Australian seaweeds: a promising resource for omega-3 fatty acids. Food Chem. 265. Doi: 10.1016/j.foodchem.2018.05.060
- Schweitzer R, Arantes R, Costódio PFS, Santo CME, Vinatea LA, Seiffert WQS, Andreatta ER. 2013. Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system

- operated with no water exchange. *Aquac. Eng.* 56:59-70. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2013.04.006
- Silva R, Borges CMS, Bezerra F. 2006. Increasing cherry tomato yield using fish effluent as irrigation water in Northeast Brazil. *Sci. Hort.* 110(1): 44-50. Doi: 10.1016/j.scienta.2006.06.006
- Slater MJ, Carton AG. 2009. Effect of sea cucumber (*Australostichopus mollis*) grazing on coastal sediments impacted by mussel farm deposition. *Mar. Pollut. Bull.* 58(8):1123-1129. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.008
- Soto D, Mena G. 1999. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture*, 171(1-2):65-81. Doi: 10.1016/S0044-8486(98)00420-7.
- Stabili L, Schirosi R, Licciano M, Mola E, Giangrande A. 2006. Bioremediation of bacteria in aquaculture waste using the polychaete *Sabella spallanzanii*. *New Biotech.* 27(6):774-781. Doi: 10.1016/j.nbt.2010.06.018
- Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Sommerfelt ST, Vinci BJ. 2002. Microbial biofloc and protein levels in green tiger shrimp. Recirculating aquaculture systems. New York: Caruga Aqua Ventures.
- Torres MA, Barros MP, Campos SCG, Pinto E, Rajamani S, Sayre RT, Colepicolo P. 2008. Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: a review. *Ecotox. Environ. Safe.* 71(1):1-15. Doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.05.009
- Troell M, Halling C, Neori A, Chopin T, Buschmann AH, Kautsky N, Yarish C. 2003. Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture*. 226(1-4):69-90. Doi: 10.1016/S0044-8486(03)00469-1
- Troell M, Joyce A, Chopin T, Neori A, Buschmann AH, Fang J. 2009. Ecological engineering in aquaculture-Potential for integrated multitrophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture*. 297(1-4):1-9. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2009.09.010
- Troell M, Kautsky N, Beveridge M, Henriksson P, Primavera J, Rönnbäck P. 2017. *Aquaculture*. En: Reference Module in Life Sciences. Elsevier. p. 189-201. Doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.02007-0
- Tyson RV, Treadwell DD, Simonne EH. 2011. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*. 21(1):6-13. Doi: 10.21273/HORTTECH.21.1.6
- Ventura Y, Sagi M. 2013. Halophyte crop cultivation: the case for *Salicornia* and *Sarcocornia*. *Environ. Exp. Bot.* 92:144-153. Doi: 10.1016/j.environexpbot.2012.07.010
- Wan AHL, Davies SJ, Soler-Vila A, Fitzgerald R, Johnson MP. 2018. Macroalgae as a sustainable aquafeed ingredient. *Aquaculture*. 11(3): 458-492. Doi: 10.1111/raq.12241
- Wang X, Broch O, Forbord S, Hand A, Skjermo J, Reitan K. 2014. Assimilation of inorganic nutrients from salmon (*Salmo salar*) farming by the macroalgae (*Saccharina latissima*) in an exposed coastal environment: implications for integrated multi-trophic aquaculture. *J. Appl. Phycol.* 26: 1869-1878. Doi: 10.1007/s10811-013-0230-1
- Yang H, Hamel JF, Mercier A. 2015. *The Sea Cucumber Apostichopus japonicus: History, Biology and Aquaculture*. 1st ed. Cambridge: Academic Press.
- Yu Z, Zhou Y, Yang H, Ma Y, Hu C. 2014. Survival, growth, food availability and assimilation efficiency of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* bottom-cultured under a fish farm in southern China. *Aquaculture*. 426/427: 238-248. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2014.02.013
- Zamora LN, Jeffs AG. 2011. Feeding, selection, digestion, and absorption of the organic matter from mussel waste by juveniles of the deposit-feeding sea cucumber *Australostichopus mollis*. *Aquaculture*. 317: 223-228. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.04.011
- Zamora LN, Jeffs AG. 2012. The ability of the deposit-feeding sea cucumber *Australostichopus mollis* to use natural variation in the biodeposits beneath mussel farms. *Aquaculture*. 326-329:116-122. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.11.015
- Zamora LN, Yuan X, Carton AG, Slater MJ. 2018. Role of deposit-feeding sea cucumbers in integrated multitrophic aquaculture: progress, problems, potential and future challenges. *Rev. Aquac.* 10: 57-74. Doi: 10.1111/raq.12147

**Forma de citación del artículo:**

Naspirán-Jojoa DC, Fajardo-Rosero AG, Ueno-Fukura M, Collazos LF. 2022. Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): una revisión. Rev Med Vet Zoot. 69(1): 75-97. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101539>