

¿PUEDEN LAS MICROALGAS SER SUSTITUTAS DEL ACEITE Y HARINA DE PESCADO EN DIETAS PARA ACUICULTURA?

CAN MICROALGAE BE SUBSTITUTES FOR FISH OIL AND FISH MEAL IN AQUACULTURE DIETS?

Alejandro Blázquez-Durán¹, Sara Flores Moreno^{1,2}, Alba Galafat Díaz², María del Carmen Cerón-García³ y Juan Antonio Martos-Sitcha¹

¹Departamento de Biología. CEI · MAR, Universidad de Cádiz, ²Departamento de Biología y Geología. CEI · MAR, Universidad de Almería, ³Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Almería

¹alejandro.blazquezduran@alum.uca.es

Resumen: El pienso empleado en acuicultura incluye elevadas cantidades de aceite y harina de pescado, ingredientes excelentes desde un punto de vista nutricional, pero insostenibles medioambientalmente debido a que requieren de la captura de pequeños peces pelágicos para su elaboración. Por este motivo, la comunidad científica busca ingredientes alternativos que permitan el desarrollo sostenible de la acuicultura y garanticen la seguridad alimentaria de la población mundial, sin perjudicar el rendimiento productivo y el bienestar de los animales cultivados. En este sentido, las microalgas se postulan como ingredientes prometedores, debido a sus buenas cualidades nutricionales y a su sostenibilidad, ayudando así a conservar el medio ambiente.

Abstract: Diet formulations used in aquaculture include high amounts of fish oil and fish meal, excellent ingredients from a nutritional point of view, but environmentally unsustainable because they require the capture of small pelagic fish for their production. For this reason, the scientific community looks for alternative ingredients that allow aquaculture sustainable development and guarantee food security for the world's population, without harming performance productive and welfare of farmed animals. In this sense, microalgae are postulated as promising ingredients, due to their good nutritional qualities and their sustainability, thus helping to conserve the environment.

Palabras clave: acuicultura, fisiología, microalgas, sostenibilidad

Keywords: aquaculture, microalgae, physiology, sustainability

1. El desarrollo sostenible en acuicultura

Las estimaciones demográficas de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indican que para 2050 la población mundial se incrementará en un 21% con respecto a los 8.000 millones de noviembre de 2022, alcanzando un total de 9.700 millones de personas en el mundo (ONU, 2022). En consecuencia, las necesidades de proteína animal aumentarán proporcionalmente, así como el consumo de alimentos acuícolas (pasando de los 20,2 kg per cápita de 2020 a los 21,6 kg per cápita para 2030) (FAO, 2022). Por ello, la acuicultura deberá de transformarse como sector, con el fin de lograr disminuir el coste de sus productos, garantizar su sostenibilidad y hacer más asequible el acceso a una dieta saludable a la población (FAO, 2022b).

A nivel internacional se han establecido políticas para orientar el desarrollo de la acuicultura, tales como el Código de Conducta para la Pesca Responsable o la Iniciativa de Crecimiento Azul de la Organización de

las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (Barg, 2018), junto con perspectivas como la economía circular (Boyd 2020), o el enfoque ecosistémico (Brugère y col., 2019), que también promueven el desarrollo de una acuicultura sostenible. La acuicultura sostenible se puede definir como toda actividad acuícola que busque proporcionar un suministro continuo de alimentos acuáticos cultivados, sin perjudicar los ecosistemas existentes, ni sobrepasar la capacidad del planeta para renovar los recursos naturales (Boyd 2020). Así, la acuicultura sostenible se ha convertido en una parte esencial de algunas de sus principales estrategias de desarrollo de la Unión Europea (UE), tales como el Pacto Verde Europeo, la estrategia *Farm to Fork* (F2F) o la Economía Azul para un Futuro Sostenible (Puszkarski y col., 2022).

En el mismo marco se encuentra la Agenda 2030, elaborada por la ONU, que establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con la finalidad de acabar

con la pobreza y generar oportunidades para todos en un planeta medioambientalmente sano, mediante la transformación de los sistemas económicos, financieros y políticos, garantizando así los derechos humanos de la población (ONU, 2020). Es de especial relevancia en acuicultura, ya que orienta a ésta en términos de gestión, planificación y formulación de políticas para fomentar su sostenibilidad (Barg, 2018). De hecho, el sector acuícola se implica en al menos 10 de los 17 ODS de la Agenda 2030 (Figura 1), contribuyendo así a la consecución de sus metas específicas (APROMAR, 2021).



Figura 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 en los que se implica la acuicultura.

2. La sostenibilidad de la alimentación en el sector acuícola

La mayor parte de la acuicultura requiere la alimentación activa de los organismos que cultiva, lo que origina un gran consumo de pienso por parte de la industria acuícola, siendo el mayor consumidor de harina y aceite de pescado del mundo (FAO, 2022). Además, el pienso supone entre el 30 y 70% de los costes de producción (Hodar y col., 2020), por lo que una mejora en la sostenibilidad económica y medioambiental de los ingredientes utilizados en su formulación, resultan claves para el desarrollo sostenible de la acuicultura. Este punto está íntimamente relacionado con los ODS 12 y 14 de la Agenda 2030, referentes a la producción y consumo sostenible, y a la vida submarina, respectivamente (APROMAR, 2021).

La sostenibilidad de los piensos dependerá de la sustitución de dos de sus ingredientes más utilizados: i) la harina de pescado (FM, *fish meal* en su término inglés) y ii) el aceite de pescado (FO, *fish oil*) (Hodar y col., 2020; Nagappan y col., 2021). La harina es elaborada a partir de la molienda y secado de pescado, mientras que el aceite es obtenido tras prensar al mismo y centrifugar la fracción líquida que

se extrae del proceso (FAO, 2022). El pescado empleado, está principalmente compuesto por pequeños pelágicos silvestres, como la anchoveta, lo que origina una dependencia de las poblaciones salvajes (Cashion y col., 2017), provocando su insostenibilidad medioambiental (Figura 2) (Shah y col., 2018). Además, las poblaciones de estos peces son muy fluctuantes, con lo que su recolección no solo es limitada, sino que también impredecible, lo que da lugar a una amplia variación en su oferta y su precio (Nagappan y col., 2021).



Figura 2: Insostenibilidad medioambiental de la harina y del aceite de pescado.

El precio de la FM y el FO se ha incrementado enormemente en los últimos años, dando lugar a un mayor coste del producto final para el consumidor, y, por tanto, a una menor accesibilidad para los productos acuícolas (FAO, 2022). Sin embargo, la falta de sustitutos que logren el reemplazo completo de los mismos sin afectar a la calidad nutricional del filete (Carvalho y col., 2020), unido a la alta calidad de la proteína de la FM y la elevada cantidad de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga n-3 (n-3 LC-PUFA) del FO, hace que sigan siendo ampliamente utilizados en la formulación de los piensos comerciales (Shah y col., 2018).

Todas estas limitaciones, junto a la existencia de otras industrias (como la ganadera o la farmacéutica) que hacen uso de estas materias primas (FAO, 2022b), refuerzan la necesidad de buscar ingredientes alternativos, que permitan el progreso de la acuicultura desde una perspectiva sostenible (Hodar y col., 2020; Shah y col., 2018).

3. Sustitutos del aceite y de la harina de pescado

En los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones sobre las posibles alternativas a la FM

y el FO, dando lugar a una amplia gama de posibilidades (Figura 3), entre las que se encuentran, en el caso de los sustitutos de la FM, la harina de subproductos acuícolas, harina de krill, harina de insectos o harina de soja (Hodar y col., 2020; Hua y col., 2019); y en el caso del FO, el aceite de soja, de palma o de subproductos acuícolas (Turchini y col., 2009).

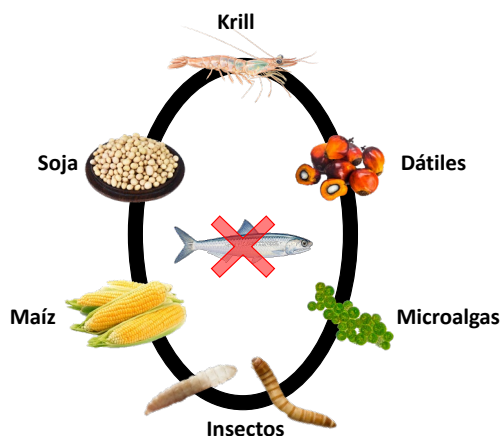


Figura 3: Materias primas alternativas a los pequeños pelágicos empleados para elaborar el aceite y la harina de pescado.

Las fuentes más utilizadas en los piensos comerciales son las alternativas vegetales, debido a su alta disponibilidad y menor coste (Sarker, 2023). Sin embargo, éstas dependen en exceso de cultivos terrestres que podrían nutrir directamente al ser humano (Stamer, 2015). Además, la mayor parte de la tierra cultivable del mundo ya está siendo explotada, y aunque el cultivo de estas materias primas ha aumentado, su excesivo consumo sobrepasa sus niveles de producción (Hardy, 2010). Por otro lado, la expansión de estos cultivos provoca otros efectos adversos diferentes a los de la FM y del FO, pero igual de importantes: i) el incremento de la eutrofización por su menor digestibilidad en especies carnívoras, ii) la gran ocupación del suelo que éstos requieren, o iii) la deforestación de áreas sensibles (Boissy y col., 2011; Klinger y col., 2012). Especial mención merece la soja, por ser uno de los ingredientes más demandados y también uno de los que mayores repercusiones ambientales origina, ya que su monocultivo disminuye la fertilidad del suelo, destruye la biodiversidad y hace un uso excesivo de los recursos hídricos (Stamer, 2015).

Además de sus implicaciones ambientales, las fuentes vegetales utilizadas como alternativas en los piensos poseen algunas desventajas nutricionales, tanto en la sustitución de la FM como del FO, principalmente en especies carnívoras (Sarker, 2023). En el caso de los aceites vegetales (VO), su principal limitante es su escaso contenido en ácidos grasos omega-3 en

comparación con los valores que presenta el FO, afectando a las cualidades organolépticas y disminuyendo la calidad nutricional del filete de pescado, ya que la cantidad de éstos, principalmente de ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA), es una de las características más valoradas del mismo (Turchini y col., 2009).

Por su parte, el uso de harinas vegetales (VM) presenta otras desventajas nutricionales, como la baja digestibilidad de sus nutrientes, debido a la elevada cantidad de factores antinutricionales que éstas presentan (Sarker, 2023), o la deficiencia de aminoácidos esenciales, especialmente metionina, lisina, triptófano y treonina (Li y col., 2009).

Debido a todos estos inconvenientes anteriormente comentados, se investigan ingredientes alternativos que puedan mejorar las cualidades nutricionales y ocasionen un menor impacto al medio que las opciones vegetales.

4. ¿Por qué las microalgas son una alternativa interesante?

Las microalgas presentan múltiples características ventajosas respecto a otras alternativas; (i) el cultivo de microalgas es superior al de las plantas terrestres, en términos de producción de biomasa (Arun y col., 2020); (ii) sus requerimientos nutricionales son relativamente sencillos en comparación con los de otros ingredientes prometedores como insectos o bacterias (Ahmad y col., 2022); (iii) son útiles biorrefinerías que tienen el potencial de coproducir metabolitos valiosos que reducen el coste de producción o que, al incluirse en el pienso, aportan un valor añadido al producto final (Nagappan y col., 2021). En cuanto a su sostenibilidad, las microalgas: (i) disminuyen el riesgo de eutrofización, al reducir la cantidad de nitrógeno excretado al medio (Shah y col., 2018); (ii) tienen una baja huella de carbono en su ciclo de producción y no requieren necesariamente de tierras fértiles (Ahmad 2022 y col.); y (iii) pueden cultivarse con aguas residuales procedentes de efluentes de otras industrias (Li y col., 2019).

Pese a estas ventajas, su verdadero potencial se encuentra en su buen balance de macronutrientes, ya que aportan la adecuada combinación de lípidos, proteínas y carbohidratos para cumplimentar los requerimientos nutricionales que necesita el pez y que garantizan la salud del mismo (Nagappan y col., 2021; Ahmad y col., 2022). Además, la composición bioquímica de las microalgas presenta una modulación y plasticidad en función de las condiciones en las que se cultiven (Sarker, 2023). Por otro lado, presentan micronutrientes (e.g. minerales o vitaminas), o metabolitos secundarios (e.g. pigmentos), que reportan beneficios para el bienestar del pez o sobre la comerciabilidad (Nagappan y col.,

2021). En el caso del bienestar del animal pueden inducir una inmunoestimulación, mejorando en la resistencia a enfermedades (Kusmayadi y col., 2021), la actividad antibacteriana, antifúngica y antiviral (Falaise y col., 2016) o poseer un efecto antioxidante debido a algunos de sus metabolitos secundarios (Shah y col., 2016).

Centrándose en los macronutrientes, las microalgas destacan por su alto contenido en proteínas y lípidos (Sarker, 2023). La proteína de las microalgas presenta un perfil de aminoácidos equilibrado, lo que evita la necesidad de suplementación de aminoácidos específicos, como la metionina, escasa en las alternativas vegetales (Nagappan y col., 2021; Li y col., 2009). Por su parte, en cuanto a los carbohidratos, es muy relevante su tipología, ya que no todos los carbohidratos se digieren con la misma facilidad; por ejemplo, el almidón es fácilmente digerible y es el que se presenta en mayor proporción, mientras que la fibra, aunque representa un menor porcentaje del total, y es más digerible que la procedente de plantas terrestres, es más difícil de digerir por ser un carbohidrato complejo (Nagappan y col., 2021). Por último, los lípidos procedentes de las microalgas presentan altas cantidades de n-3 LC-PUFA, carentes en otras alternativas (Sarker, 2023), y de especial relevancia, puesto que reportan grandes beneficios para la salud humana (Calder 2014) y para el sistema inmunitario del pez (Lu y col., 2021). Además, se ha demostrado que las microalgas mejoran la proporción de ácidos grasos omega-3 frente a los omega-6, gracias a su alto contenido en EPA y DHA, beneficiando así a los consumidores, que disponen, en este sentido, de un producto de mayor calidad nutricional (Chen y col., 2019).

Sin embargo, existen una serie de limitaciones o desventajas asociadas a la producción y al consumo de microalgas por parte de los peces, como que algunas especies presentan factores antinutricionales que pueden afectar al crecimiento de los ejemplares o la baja digestibilidad por la celulosa de sus paredes (Ahmad y col., 2022). Además, el coste de producción es muy alto, lo que dificulta su incorporación en grandes porcentajes en piensos acuícolas. Por este motivo, el aceite de microalgas duplica en precio al del FO, lo que lo convierte en un ingrediente económicamente poco rentable (Sarker, 2023).

Para solventar estos inconvenientes, los investigadores han propuesto diversas soluciones. Por ejemplo, en el caso de la digestibilidad, una posible solución es pretratar las microalgas mediante técnicas como la hidrólisis enzimática, que degrada los constituyentes de la pared celular y aumenta la biodisponibilidad de nutrientes (Teuling y col., 2019; Molina-Roque y col., 2022). Por su parte, los factores antinutricionales se pueden eliminar con un pretratamiento basado en la actividad enzimática de

microorganismos específicos (Ahmad y col., 2022). Por último, en cuanto al coste de producción, se puede reducir modificando el mecanismo de recolección de la biomasa de microalgas, proceso que supone entre un 20 y un 30% del coste total (Barros y col., 2015), mediante el uso de biofloclantes naturales de bacterias u hongos (Lu y col., 2021). Además, otro enfoque complementario es usar fuentes de carbono alternativas en su cultivo, como el CO₂ emitido por centrales energéticas (Van Den Hende y col., 2012), o el carbono orgánico de efluentes residuales (Li y col., 2019).

Diversos estudios anteriores han demostrado el potencial de las microalgas como ingredientes alternativos a la FM y el FO, siendo un ejemplo la sustitución completa del FO en tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) usando *Schizochytrium* sp. como alternativa, lo que supuso un incremento significativo en la ganancia de peso y en el índice de eficiencia proteica, junto con un menor consumo de alimento y una tasa de conversión del alimento más baja, sin producirse efectos negativos significativos (Sarker y col., 2016). Por su parte, como ejemplo de la sustitución parcial de la FM, se encuentra el uso de *Tetraselmis suecica* en lubina europea (*Dicentrarchus labrax*), bajo un reemplazo del 20%, sin dar lugar a efectos perjudiciales sobre el crecimiento o la calidad de la lubina, e incluso mejorando la pigmentación de su piel, hacia un tono más verdoso (Tulli y col., 2012).

Las soluciones propuestas para sus limitaciones, las grandes cualidades nutricionales de las microalgas y los buenos resultados obtenidos en la sustitución de la FM y el FO, las sitúan como interesantes ingredientes alternativos (Shah y col., 2018). Sin embargo, aún se sigue necesitando ampliar el conocimiento sobre los efectos fisiológicos producidos sobre las diferentes especies de peces cultivadas en acuicultura.

5. ¿Cómo se realiza un estudio sobre la respuesta fisiológica ante la inclusión de microalgas en peces?

En relación al uso de microalgas en piensos para la alimentación de especies acuícolas, una de las cuestiones más relevantes a nivel productivo es cómo afectan al crecimiento y metabolismo de los especímenes cultivados. Para evaluar estos efectos, se debe de realizar un ensayo que determine si el ingrediente incluido es adecuado y en qué proporción se obtiene el máximo beneficio.

Para ilustrar la realización de un experimento de estas características, se pondrá de ejemplo el último estudio realizado en colaboración entre la Universidad de Cádiz y la Universidad de Almería en esta línea de investigación. El objetivo de éste fue caracterizar el potencial nutricional de aceites y harinas extraídas de diferentes especies de microalgas

(*Nannochloropsis* sp. e *Isochrysis* sp.) como sustituto del FO y de la FM, estableciendo sus efectos a nivel fisiológico tras la alimentación de juveniles de dorada (*Sparus aurata*) bajo condiciones estándar de cultivo.

Se realizó un ensayo de alimentación a medio/largo plazo (78 días) con cuatro piensos diferentes: un pienso control de formulación similar a la comercial para *S. aurata*, y tres piensos experimentales con una composición similar al control, en los que se realizó la sustitución de la FM y del FO en diferentes porcentajes (50, 75 y 100% en el caso del FO, y 25% en el de la FM) por harinas y aceites de microalgas, elaborados a partir de *Nannochloropsis* sp. e *Isochrysis* sp.

En el ensayo se emplearon 264 ejemplares de juveniles de *S. aurata* con un peso promedio inicial de aproximadamente 10 gramos, distribuidos en 12 tanques de 400 L (Figura 4) en las instalaciones de los Servicios Centrales de Investigación de Cultivos Marinos (SCI-CM, Puerto Real) de la Universidad de Cádiz. Cada dieta experimental se evaluó por triplicado, mediante la alimentación hasta saciedad aparente (*ad libitum*) en 5 tomas diarias, ayunándose los domingos y el día anterior a la realización de cada uno de los muestreos realizados. Por otro lado, se controló la ingesta semanal a través de métodos gravimétricos, lo que, *a posteriori*, permitió el cálculo de la eficiencia de alimentación.



Figura 4: Tanques empleados en el proyecto.

Durante la fase experimental, cada 21 días aproximadamente, se realizaron muestreos biométricos, para llevar un control sobre el crecimiento de los ejemplares cultivados. Al finalizar el periodo experimental, los juveniles de dorada (n=12 peces por grupo experimental) se sacrificaron por sobredosis de anestésico y se extrajeron diferentes muestras biológicas (Figura 5), para el posterior análisis de sus metabolitos en el laboratorio, y el cálculo de diversos índices somáticos; además, se realizó el último biométrico, con el que se calcularon diferentes índices zootécnicos.

Posteriormente, en función del tejido se analizaron diferentes metabolitos como glucosa, glucógeno, triglicéridos, colesterol, entre otros. Las técnicas empleadas se basan en reacciones colorimétricas, producidas durante un periodo de incubación. Dichas

reacciones dan lugar a un compuesto a partir del cual se determina la concentración del metabolito, gracias a la lectura de la absorbancia tanto de las réplicas como de la recta patrón a una determinada longitud de onda.

Finalmente, con toda la información obtenida (valores de los índices zootécnicos y somáticos y niveles de metabolitos) de cada grupo experimental, se discuten los resultados obtenidos y se extraen las conclusiones pertinentes.

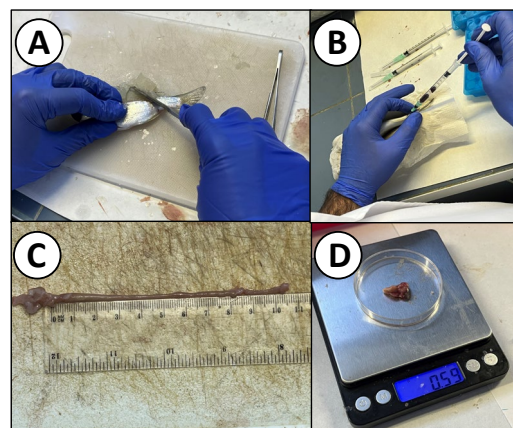


Figura 5: Algunas de las muestras biológicas extraídas en el muestreo final. A: músculo, B: sangre, C: intestino y D: hígado.

En este caso, el estudio determinó que la harina y el aceite de microalgas incorporados en los diferentes piensos experimentales, mostraron ser sustitutos adecuados de la FM y del FO en medio/alto porcentaje, ya que no se produjeron efectos negativos a nivel metabólico y se obtuvieron índices de crecimiento, desarrollo y eficiencia de alimentación similares a los de la dieta control, en todos los porcentajes de sustitución analizados. A partir de ello, se deberá evaluar si la inclusión de estos ingredientes extraídos de las microalgas pueden ser buenos candidatos para piensos acuícolas, principalmente en términos económicos.

Referencias:

- Ahmad, A. y otros. (2022) An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521–9547.
<https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>
- APROMAR. (2021). *Memoria de sostenibilidad 2021*.
<https://apromar.es/wp-content/uploads/2021/12/MEMORIA-DE-SOSTENIBILIDAD-2021-de-Acuicultura-de-Espan%CC%83a.pdf>

- Arun, J. y otros. (2020). A conceptual review on microalgae biorefinery through thermochemical and biological pathways: bio-circular approach on carbon capture and wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100477. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100477>
- Barg, U. (2018). Aquaculture, the 2030 agenda for sustainable development and FAO's common vision for sustainable food and agriculture. *FAO Aquaculture Newsletter*, 58, 47–48. <https://www.proquest.com/openview/08651391108fc2cca8872fb044c97ffe/1?pq-origsite=gscholar&cbl=237326>
- Barros, A. I. y otros. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1489–1500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>
- Boissy, J. y otros. (2011). Environmental impacts of plant-based salmonid diets at feed and farm scales. *Aquaculture*, 321(1-2), 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.08.033>
- Boyd, C. E. y otros. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578–633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>
- Brugère, C. y otros. (2019). The ecosystem approach to aquaculture 10 years on – a critical review and consideration of its future role in blue growth. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 493–514. <https://doi.org/10.1111/raq.12242>
- Calder, P. C. (2014). Very long chain omega-3 (n-3) fatty acids and human health. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(10), 1280–1300. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400025>
- Carvalho, M. y otros. (2020). Effective complete replacement of fish oil by combining poultry and microalgae oils in practical diets for gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fingerlings. *Aquaculture*, 529, 735696. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735696>
- Cashion, T. y otros. (2017). Most fish destined for fishmeal production are food-grade fish. *Fish and Fisheries*, 18(5), 837–844. <https://doi.org/10.1111/faf.12209>
- Chen, W. y otros. (2019). Two filamentous microalgae as feed ingredients improved flesh quality and enhanced antioxidant capacity and immunity of the gibel carp (*Carassius auratus gibelio*). *Aquaculture Nutrition*, 25(5), 1145–1155. <https://doi.org/10.1111/anu.12930>
- Falaise, C. y otros. (2016). Antimicrobial compounds from eukaryotic microalgae against human pathogens and diseases in aquaculture. *Marine Drugs*, 14(9), 159. <https://doi.org/10.3390/md14090159>
- FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022*. <https://www.fao.org/documents/card/en?details=CC0461ES>
- FAO. (2022b). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022*. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/cc0639es>
- Hardy, R. W. (2010). Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. *Aquaculture Research*, 41(5), 770–776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02349.x>
- Hodar, A. R. y otros. (2020). Fish meal and fish oil replacement for aqua feed formulation by using alternative sources: a review. *Journal of Experimental Zoology India*, 23(1), 13–21. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20203130877>
- Hua, K. y otros. (2019). The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. *One Earth*, 1(3), 316–329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>
- Klinger, D. y Naylor, R. (2012). Searching for solutions in aquaculture: charting a sustainable course. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 247–276. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021111-161531>
- Kusmayadi, A. y otros. (2021). Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere*, 271, 129800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129800>
- Li, K. y otros. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: a review. *Bioresource Technology*, 291, 121934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121934>
- Li, P. y otros. (2009). New developments in fish amino acid nutrition: towards functional and environmentally oriented aquafeeds. *Amino Acids*, 37, 43–53. <https://doi.org/10.1007/s00726-008-0171-1>
- Lu, Q. y otros. (2021). A state-of-the-art review on the synthetic mechanisms, production technologies, and practical application of polyunsaturated fatty acids from microalgae. *Algal Research*, 55, 102281. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102281>

- Molina-Roque, L. y otros. (2022). Biotechnological treatment of microalgae enhances growth performance, hepatic carbohydrate metabolism and intestinal physiology in gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles close to commercial size. *Aquaculture Reports*, 25, 101248. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101248>
- Nagappan, S. y otros. (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of Biotechnology*, 341, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- ONU. (2020). *Informe de los objetivos de desarrollo sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf
- ONU. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf
- Puszkarski, J. y Śniadach, O. (2022). Instruments to implement sustainable aquaculture in the European Union. *Marine Policy*, 144, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105215>
- Sarker, PK. y otros. (2016). Towards sustainable aquafeeds: complete substitution of fish oil with marine microalga *Schizochytrium* sp. improves growth and fatty acid deposition in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *PLOS ONE*, 11(6), e0156684. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156684>
- Sarker, PK. (2023). Microorganisms in fish feeds, technological innovations, and key strategies for sustainable aquaculture. *Microorganisms*, 11(2), 439. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020439>
- Shah, MR. y otros. (2016). Astaxanthin-producing green microalga *Haematococcus pluvialis*: from single cell to high value commercial products. *Frontiers in Plant Science*, 7, 531. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00531>
- Shah, MR. y otros. (2018). Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. *Journal of applied phycology*, 30, 197-213. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1234-z>
- Stamer, A. (2015). Insect proteins—a new source for animal feed. *EMBO Reports*, 16(6), 676–680. <https://doi.org/10.15252/embr.201540528>
- Teuling, E. y otros. (2019). Cell wall disruption increases bioavailability of *Nannochloropsis gaditana* nutrients for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 499, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.047>
- Tulli, F. y otros. (2012). Effect of the inclusion of dried *Tetraselmis suecica* on growth, feed utilization, and fillet composition of European sea bass juveniles fed organic diets. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 21(3), 188–197. <https://doi.org/10.1080/10498850.2012.664803>
- Turchini, GM. y otros. (2009). Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1(1), 10-57. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x>
- Van Den Hende, S. y otros. (2012). Flue gas compounds and microalgae: (bio-)chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1405–1424. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.015>