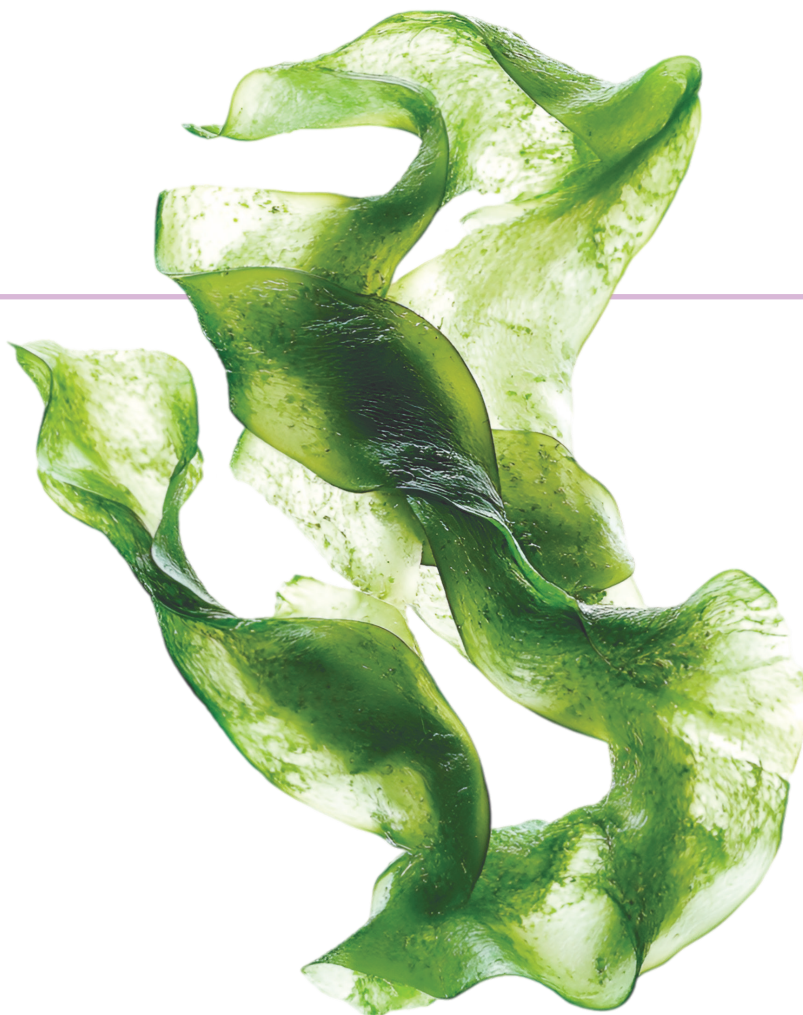


COMPUESTOS DE INTERÉS INDUSTRIAL PRODUCIDOS POR MICROALGAS: UNA ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA SU PRODUCCIÓN

Brenda Yanin Azcárraga-Salinas^{1*}, María Myrna Solís-Oba¹, Luis Carlos Fernández-Linares¹, Javier Ruiz-Romero¹, José Agustín Pacheco-Ortiz¹, Andres Castro-Sierra¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIBA Tlaxcala. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, C.P. 90700. Tlaxcala, México.

*Autor para correspondencia: bazcarragas1900@alumno.ipn.mx



RESUMEN

La contaminación atmosférica por el CO₂ proveniente de los combustibles fósiles y por las actividades industriales para la elaboración de diversos productos de valor agregado, es un problema creciente que requiere de la atención y búsqueda de alternativas amigables con el ambiente. Una alternativa son las microalgas, éstas tienen la capacidad de producir compuestos de valor agregado, aplicables en diferentes industrias. Esta revisión expone qué son las microalgas, sus principales aplicaciones en la industria y los principales retos a los que se enfrenta su producción.

Palabras clave: Microalgas, lípidos, proteínas, carbohidratos

ABSTRACT

Air pollution due to CO₂ from fossil fuels, and for the industrial activities to get the production of various value-added products, is a growing problem that requires attention and the search for more environmentally friendly. One alternative is the microalgae, they have the capacity to produce value-added compounds, useful in different industries. This review explains what microalgae are, their main applications in the industry and the main challenges faced by their production.

Keywords: Microalgae, lipids, proteins, carbohydrates

Introducción

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos, existen en diferentes entornos acuáticos de agua dulce como ríos, lagos y estanques y agua salada. Las microalgas pueden crecer rápidamente generando una gran cantidad de biomasa en cuya composición se encuentran diferentes compuestos de interés industrial como pigmentos, proteínas, carbohidratos y lípidos (Dolganuk et al., 2020). Estos compuestos de interés pueden ser aprovechados para la obtención de biocombustibles, alimentos, suplementos y piensos; es por ello por lo que las microalgas tienen diversas aplicaciones biotecnológicas, lo que ha despertado un creciente interés en el ámbito científico e industrial Figura 1.

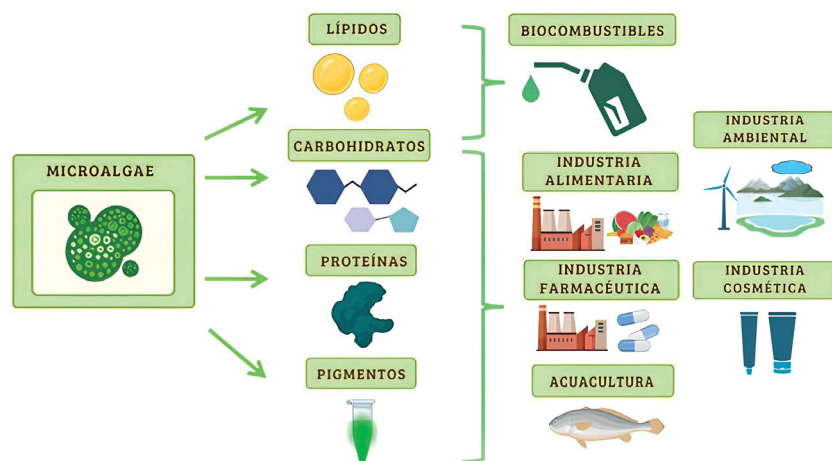
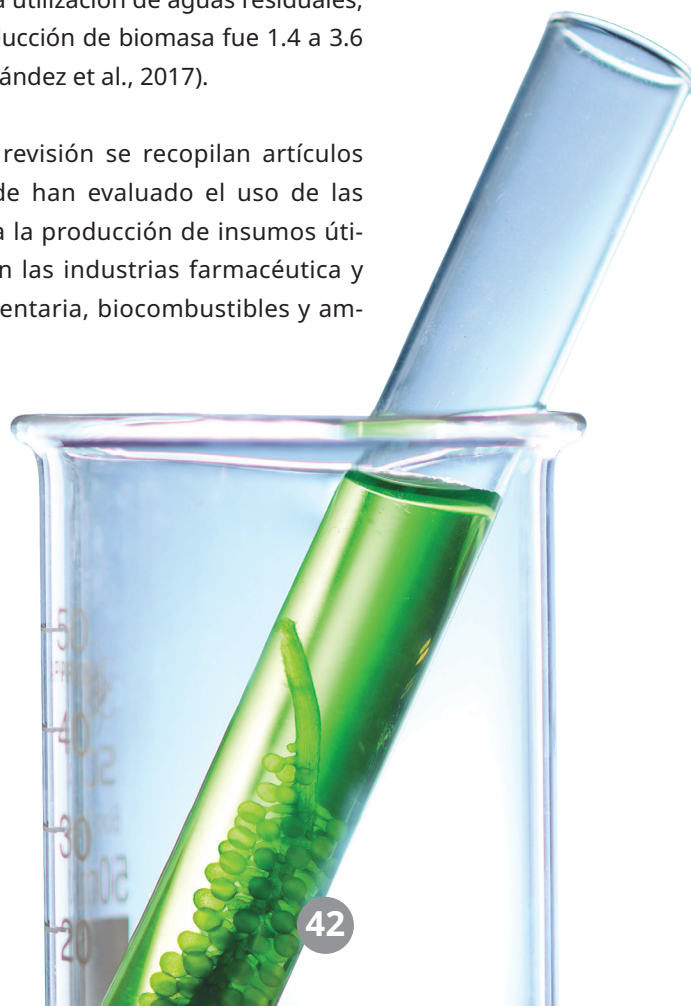


Figura 1. Compuestos de interés industrial producidos por microalgas y sus aplicaciones industriales.

Algunas ventajas de las microalgas para la obtención de estos productos de interés respecto a sistemas de producción convencionales, son que no requieren grandes extensiones de suelo para ser cultivadas y utilizan menor cantidad de agua y espacio para poder crecer. Entre las desventajas están que las microalgas son comúnmente cultivadas en medios convencionales, formulados con reactivos, sales y minerales obtenidos de procesos petroquímicos, lo cual no es amigable con el medio ambiente y eleva el costo del cultivo (Debowski et al., 2020). Entre los medios más utilizados para el cultivo de microalgas están el BG-11, BBM, F/2, Zarowk, Conway Walne (Pandey et al., 2025; Chew et al., 2018). El crecimiento de las microalgas se puede ver influenciado por condiciones químicas y físicas, por ejemplo, cuando la concentración de nutrientes es limitada, se producen metabolitos tóxicos, la tasa de crecimiento disminuye y con ello comienza la producción y almacenamiento de metabolitos secundarios, sin embargo, la célula decae y muere poco tiempo después (García-Gozalbes et al., 2015).

Se han evaluado diversos medios de cultivo alternos que reducen el impacto ambiental y los costos de producción, como por ejemplo un estudio a gran escala indica que, con la utilización de medios de cultivo tradicionales, el costo va de 2.3 a 4.5 €/kg, y con la utilización de aguas residuales, el costo de producción de biomasa fue 1.4 a 3.6 €/kg (Acién Fernández et al., 2017).

En la presente revisión se recopilan artículos científicos donde han evaluado el uso de las microalgas para la producción de insumos útiles aplicables en las industrias farmacéutica y cosmética, alimentaria, biocombustibles y ambiental.



1.1 Producción de compuestos bioactivos para la industria alimentaria

La mayor parte de los productos de interés industrial obtenidos a partir de microalgas van para la industria alimentaria tanto para el consumo humano como para la nutrición animal. En el año 2021, alrededor del 43% correspondió al uso de la biomasa microalgal como alimento o la realización de nutraceuticos y suplementos alimentarios en Europa (Araújo et al., 2021), figura 2.

Hay gran cantidad de especies reportadas de microalgas como una importante fuente de nutrientes. Algunas de estas especies son *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Haematococcus pluvialis* y *Dunaliella salina*. Estas son utilizadas por su capacidad para producir compuestos bioactivos como carotenos, lípidos (especialmente omega 3 y 6), proteínas, carbohidratos y diferentes vitaminas y minerales (Molino et al., 2018). En el caso de *Arthrospira platensis* tienen del 42-70% de proteína, produce todos los aminoácidos esenciales para el consumo humano; dichas proteínas son semejantes a las del huevo, la albúmina y la soya (Kumar et al., 2022). La ficocianina y la ficobilina, proteínas de alto valor en el ámbito nutricional, son producidas mayoritariamente por la microalga *Spirulina* (Thevarajah et al., 2022).

Las microalgas también pueden sintetizar ácidos grasos Omega 3 y 6, éstos no pueden ser sintetizados por el cuerpo humano y se requiere adquirirlo a través de la ingesta. Estos mejoran el funcionamiento cardiovascular y cognitivo. Las microalgas productoras de omega-3 son *Cryptothecodinium*, *Thraustochytrium* y *Schizochytrium*, mientras que las microalgas productoras de omega-6 son *Phaeodactylum*, *Chlorella* y *Monodus*. Se estima que el Omega-3 tenga un incremento en el mercado en los próximos años (Jones et al., 2014). Algunos ejemplos de productos comerciales obtenidos con biomasa microalgal, tienen el mismo nombre del compuesto de interés en cuestión o la microalga de la cual se obtie-

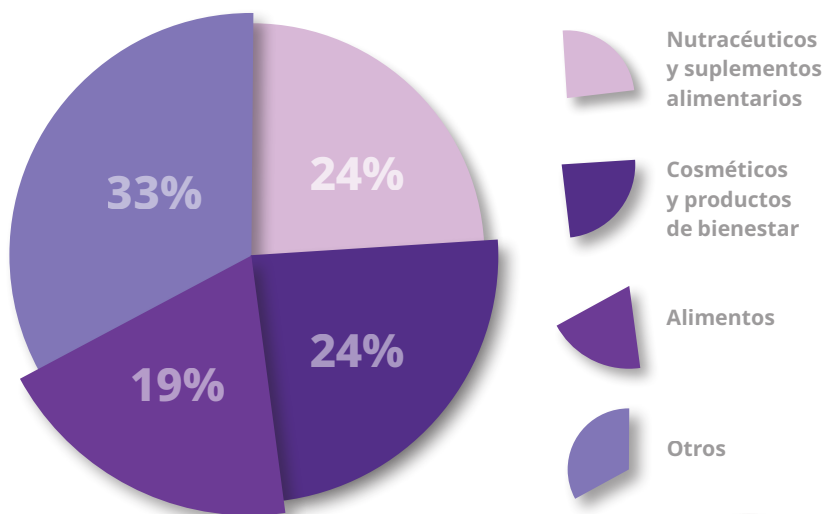


Figura 2. Aplicaciones de la biomasa microalgal en Europa, (Araújo et al., 2021).



ne su biomasa. Por mencionar algunos se encuentran la vitamina B12, E, α y β - caroteno, astaxantina, luteína, zeaxantina, cantaxantina, fucoxantina, fitoeno, fitoflueno, clorofila A, ficocianina, ficoeritrina, ácido oleico, láurico, linoleico, linolénico, fitol, lípidos y carotenoides, así como las microalgas comercializadas *Chlorella* o *espirulina* (García et al., 2017).

1.2 Producción de compuestos bioactivos para la industria farmacéutica y cosmética

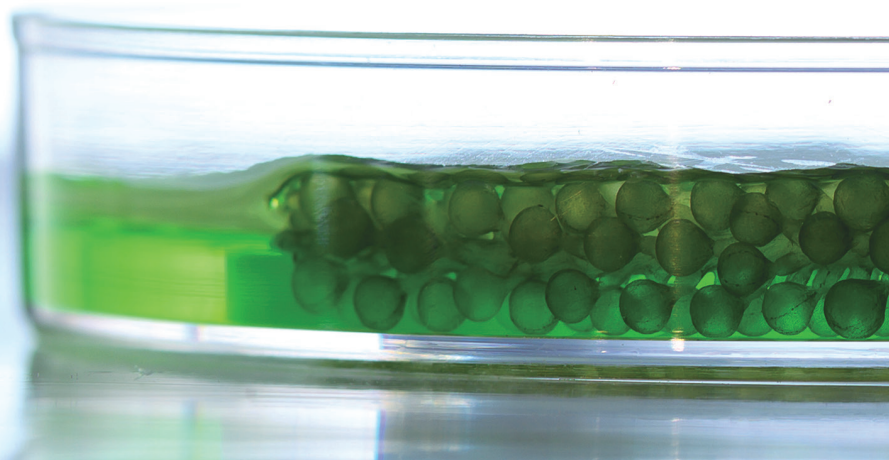
Las microalgas también producen compuestos utilizados en las industrias cosmética y farmacéutica. Los ejemplos más representativos son los pigmentos naturales, algunos tipos de antioxidantes, distintos polisacáridos y algunos lípidos con propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas (Hernández-Pérez y Labbé, 2014)

Un pigmento natural de interés farmacológico es la astaxantina, la cual tiene diversas aplicaciones, desde la acuicultura, la coloración de peces, hasta la industria farmacéutica, tiene un gran potencial antioxidante y benéfico para pacientes con enfermedades cardiovasculares, autoinmunes, inflamatorias y neurodegenerativas (Wu *et al.*, 2015). La astaxantina es producida principalmente por la microalga *Haematococcus pluvialis* y su potencial uso ha incrementado su interés en la industria farmacéutica (Koller *et al.*, 2014). El costo estimado de síntesis es de doscientos millones para producir 130 toneladas de producto anualmente, por lo que el precio en el mercado es mayor a 2000 USD por kilogramo y el costo de obtención es de alrededor de 1000 USD por kilogramo (Shah *et al.*, 2016); mientras que la obtenida a partir de microalgas es de alrededor de 15,000 UDD/kg (Ancién-Fernández *et al.*, 2017), por lo que del total de la producción de astaxantina, solo el 1% se obtiene actualmente de microalgas debido a los altos costos, hace falta la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan disminuir costos (Koller *et al.*, 2014). *Haematococcus pluvialis* es la microalga más competitiva en la producción de astaxantina a escala industrial, supera hasta en un 5% la producción microbiana (Patel *et al.*, 2022). El rendimiento de biomasa y astaxantina en condiciones normales de cultivo fue de 0,8–1,3 g/L y 12–18 mg/g y de 1,53 g/L de biomasa y 25,92 mg/g de contenido de astaxantina bajo estrés salino (Chen *et al.*, 2017).

Otro pigmento natural importante es el betacaroteno, que es un potente antioxidante y una buena fuente de vitamina A; debido a sus características antioxidantes, el beta-caroteno es considerado un inhibidor de genes can-

cerígenos. Este pigmento es producido mayoritariamente por la microalga *Dunaliella* (Zhang *et al.*, 2016). Dicha microalga es utilizada para suplementos, contiene alrededor del 60% de proteína, con un aminograma rico en todos los aminoácidos esenciales. El betacaroteno tiene gran impacto comercial, tan solo en el año 2017 tuvo ventas de alrededor de 247 millones de dólares (Rastogi *et al.*, 2017).

Algunos otros compuestos químicos de uso farmacológico y cosmético son las ficobilinas, que son pigmentos proteicos de colores brillantes como la ficoeritrina y fucoxantina, que se han utilizado como antiespumantes y colorantes para la producción de tintas y resinas. La ficoeritrina es carotenoide, específicamente un complejo de pigmento proteico rojo utilizado como un colorante natural producido por microalgas rojas como *Arthrospira platensis* (Taufiqurrahmi *et al.*, 2017). La fucoxantina es otro carotenoide que tiene propiedades antioxidantes, útiles para la salud humana. Este compuesto es producido por algas marrones como *Sphaerotrichia divaricata* (Maeda *et al.*, 2018). Microalgas como *A. platensis* y *A. máxima* pueden producir hasta el 50-60% de ficobilinas del total de proteínas solubles producidas por la microalga (Pagels *et al.*, 2019).



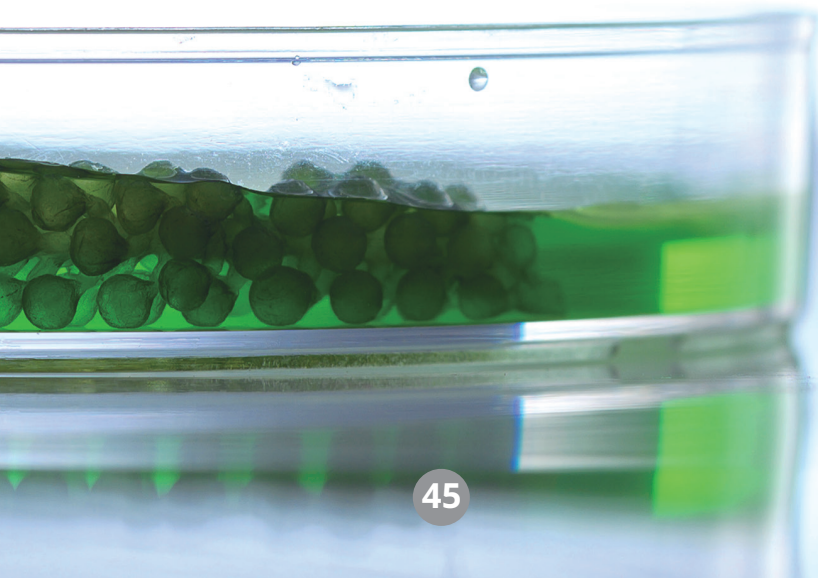
1.3 Producción de ácidos grasos para la obtención de biodiésel

Una de las aplicaciones más conocidas de las microalgas es su capacidad para producir ácidos grasos que pueden ser transformados a biodiésel. Bajo estrés de nutrientes se favorece la producción de lípidos y la formación de triacilglicerol (TAG), que es el precursor para la formación de ácidos grasos metil ésteres (FAMES) (Khoo et al., 2023). En condiciones adecuadas, las microalgas pueden acumular grandes cantidades de lípidos intracelulares. Se estima que con las microalgas se puede producir 10 veces mayor cantidad de biodiesel por unidad de superficie de tierra que una planta oleaginosa terrestre (Bošnjaković y Sinaga, 2020). Los ácidos grasos provenientes de las microalgas son mayoritariamente poliinsaturados de cadena larga, lo cual proporciona buenas propiedades en el biodiésel, entre ellos el número de cetano, la estabilidad a la oxidación y las propiedades de flujo en frío al biocombustible (Castillo et al., 2017). Diferentes especies de microalgas de agua dulce producen ácidos grasos como el ácido palmítico, esteárico, oleico, linoleico y linolénico (Tejeda-Benítez et al., 2015).

El contenido de lípidos producidos depende de la especie de microalga y de las condiciones de cultivo. Las especies reportadas con mayor contenido de lípidos son: *Botryococcus braunii* (25-75%), *Chlorella emersonii* (25-63%) y *Nannochloris* sp. (25-56%) (Mata et al., 2010).

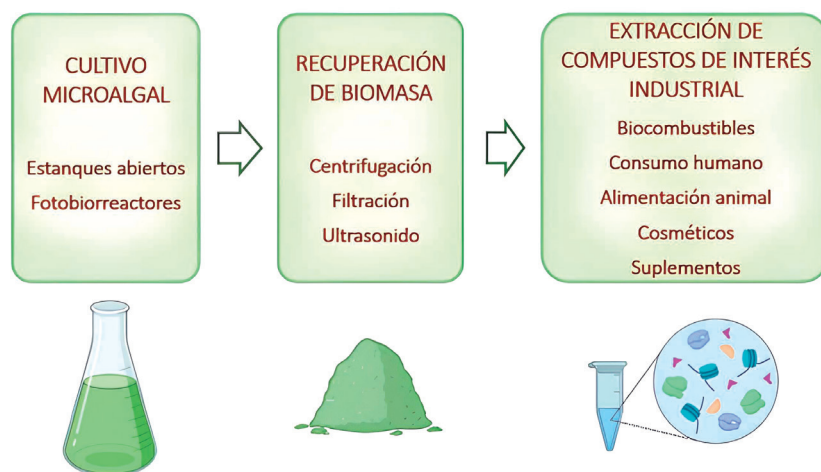
1.4 Reducción de compuestos tóxicos para el medio ambiente

Otra aplicación de las microalgas es para la mitigación del cambio climático, gracias a su capacidad para utilizar el CO_2 y a través de la fotosíntesis, convertirlo en O_2 , contribuyen a reducir la concentración de CO_2 del ambiente. Además, considerando las cantidades de suelo, agua y espacio que se requieren para realizar una reforestación, las microalgas son una alternativa viable para contribuir y reducir este gas de efecto invernadero. Las microalgas son altamente eficientes en la fijación de CO_2 y la captación de energía solar hasta 4 veces superior a la de las plantas (Pires et al., 2012). Además, las microalgas tienen la capacidad de eliminar o biotransformar compuestos contaminantes de un medio líquido o gaseoso, así un sistema de cultivo microalgal puede tener tres significativos propósitos, por un lado, disminuir los contaminantes presentes en el aire y por el otro la producción de biomasa y compuestos de interés con fines comerciales (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).



1.5 Retos y perspectivas para la utilización de microalgas

Si bien, hay una gran variedad de compuestos de valor agregado que se pueden obtener de las microalgas, aún existen múltiples dificultades para la obtención de grandes rendimientos de biomasa microalgal y de la obtención de dichos compuestos. Entre las dificultades se encuentran la composición de los medios de cultivo, la tasa de aireación, intensidad de iluminación, temperatura, ciclo luz/oscuridad, velocidad de crecimiento microalgal; selección y manipulación de cepas; optimización de los procesos de recuperación de biomasa, extracción y purificación de los productos de interés; manejo de los subproductos, tecnología de transesterificación (Acka et al., 2023). El reto es desarrollar un proceso sustentable y económicamente viable, el camino es largo y aún existen muchos retos tecnológicos y económicos para la producción industrial de estos compues-



tos de valor agregado a partir de microalgas. A continuación, se describe de manera general, las etapas para la extracción de compuestos de interés industrial y los puntos donde se puede mejorar dicho proceso (figura 3).

Figura 3. Compuestos de interés industrial producidos por microalgas y sus aplicaciones industriales.

2

Conclusiones

Las microalgas representan un recurso importante y potencial biotecnológico significativo aplicable en áreas como el medio ambiente, la salud y la alimentación, por su capacidad para la producción de compuestos de interés industrial en dichas áreas. Sin embargo, esta capacidad de producción puede incrementarse bajo investigaciones para lograr su máximo

aprovechamiento. Adicionalmente el uso de microalgas para obtención de productos de interés industrial es una alternativa ambientalmente amigable ya que se reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, así como residuos industriales que pudieran ser contaminantes. Sin embargo, aún queda un camino largo en la investigación y desarrollo de mejores técnicas y condiciones de cultivo para la obtención de una mayor cantidad de biomasa y una mayor producción de compuestos de interés.

3

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado a través del proyecto 20240606, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada No.1003544.

REFERENCIAS

- Acien Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., & Molina Grima, E. (2019). Chapter 21—Costs analysis of microalgae production. A. Pandey, J.-S. Chang, C. R. Soccol, D.-J. Lee, & Y. Chisti (Eds.), *Biofuels from Algae* (Second Edition) (pp. 551-566). Elsevier.
- Akca, M. S., Kinaci, O. K., & Inanc, B. (2024). Improving light availability and creating high-frequency light-dark cycles in raceway ponds through vortex-induced vibrations for microalgae cultivation: A fluid dynamic study. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47(11), 1863-1874. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03074-5>
- Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., García Tasende, M., Ghaderiadekani, F., Ilmjärvi, T., Laurans, M., Mac Monagail, M., Mangini, S., Peteiro, C., Rebours, C., Stefansson, T., & Ullmann, J. (2021). Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7.
- Bošnjaković, M., and Sinaga, N. (2020). The Perspective of Large-Scale Production of Algae Biodiesel. *Applied Sciences*, 10(22), Article 22.
- Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., Rodríguez-Núñez, J. R., (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: Avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3), 337-352.
- Chen, H., Zheng, Y., Zhan, J., He, C., & Wang, Q. (2017). Comparative metabolic profiling of the lipid-producing green microalga *Chlorella* reveals that nitrogen and carbon metabolic pathways contribute to lipid metabolism. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 153.
- Chew, K. W., Chia, S. R., Show, P. L., Yap, Y. J., Ling, T. C., & Chang, J.-S. (2018). Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 332-344.
- Dębowski, M., Zieliński, M., Kazimierowicz, J., Kujawska, N., & Talbier, S. (2020). Microalgae Cultivation Technologies as an Opportunity for Bioenergetic System Development—Advantages and Limitations. *Sustainability*, 12(23), Article 23.
- Dolganyuk, V., Belova, D., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Katserov, D., Patyukov, N., & Sukhikh, S. (2020). Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. *Biomolecules*, 10(8), Article 8.
- García, J. L., de Vicente, M., & Galán, B. (2017). Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1017-1024.
- García-Gozalbes, C. C., Arbib, Z., & Perales-Vargas-Machuca, J. A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 49-68.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Jones, P. J. H., & Rideout, T. (2014). Lipids, sterols, and their metabolites. In A. C. Ross, B. Caballero, R. J. Cousins, K. L. Tucker, & T. R. Ziegler (Eds.), *Modern nutrition in health and disease* (11th ed.). Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins
- Kho, K. S., Ahmad, I., Chew, K. W., Iwamoto, K., Bhatnagar, A., & Show, P. L. (2023). Enhanced microalgal lipid production for biofuel using different strategies including genetic modification of microalgae: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 96, 101071.
- Koller, M., Muhr, A., & Braunegg, G. (2014). Microalgae as versatile cellular factories for valued products. *Algal Research*, 6, 52-63.
- Kumar, R., Hegde, A. S., Sharma, K., Parmar, P., & Srivatsan, V. (2022). Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides – Current trends and future prospects. *Food Research International*, 157, 111338.
- Maeda, H., Fukuda, S., Izumi, H., & Saga, N. (2018). Anti-Oxidant and Fucoxanthin Contents of Brown Alga *Ishimozuku* (*Sphaerotrichia divaricata*) from the West Coast of Aomori, Japan. *Marine Drugs*, 16(8), Article 8.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, Nidia. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Molino, A., Iovine, A., Casella, P., Mehariya, S., Chianese, S., Cerbone, A., Rimauro, J., & Musmarra, D. (2018). Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), Article 11.
- Pagels, F., Guedes, A. C., Amaro, H. M., Kijoa, A., & Vasconcelos, V. (2019). Phycobiliproteins from cyanobacteria: Chemistry and biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 37(3), 422-443.
- Pandey, S., Narayanan, I., Vinayagam, R., Selvaraj, R., Varadavenkatesan, T., & Pugazhendhi, A. (2023). A review on the effect of blue green 11 medium and its constituents on microalgal growth and lipid production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109984.
- Patel, A. K., Tambat, V. S., Chen, C.-W., Chauhan, A. S., Kumar, P., Vadrle, A. P., Huang, C.-Y., Dong, C.-D., & Singhania, R. R. (2022). Recent advancements in astaxanthin production from microalgae: A review. *Bioresource Technology*, 364, 128030.
- Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Simões, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3043-3053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.055>
- Rastogi, R. P., Madamwar, D., & Pandey, A. (2017). Algal Green Chemistry: Recent Progress in Biotechnology. Elsevier.
- Shah, M. M. R., Liang, Y., Cheng, J. J., & Daroch, M. (2016). Astaxanthin-Producing Green Microalga *Haematococcus pluvialis*: From Single Cell to High Value Commercial Products. *Frontiers in Plant Science*, 7.
- Taufiqurrahmi, N., Religia, P., Mulyani, G., Suryana, D., Ichsan, Tanjung, F. A., & Arifin, Y. (2017). Phycocyanin extraction in *Spirulina* produced using agricultural waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 206(1), 012097.
- Tejeda-Benítez, L., Henao-Argumedo, D., Alvear-Alayón, M., & Castillo-Saldría, C. R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24(39), 43-54.
- Thevarajah, B., Nishshanka, G. K. S. H., Premaratne, M., Nimarshana, P. H. V., Nagarajan, D., Chang, J.-S., & Ariyadasa, T. U. (2022). Producción a gran escala de proteínas basadas en espirulina y c-ficocianina: Un enfoque de biorrefinería. *Biochemical Engineering Journal*, 185, 108541.
- Zhang, Z.-Q., Cao, W.-T., Liu, J., Cao, Y., Su, Y.-X., & Chen, Y.-M. (2016). Greater serum carotenoid concentration associated with higher bone mineral density in Chinese adults. *Osteoporosis International*, 27(4), 1593-1601.

