

Uso de microalgas en la industria química de Colombia: una revisión

Use of Microalgae in the Colombian Chemical Industry: A Review

Johan Manuel Cifuentes Castellanos

Programa de Tecnología en Regencia de Farmacia, Corporación Tecnológica de Bogotá, Colombia
johan.cifuentes@ctb.edu.co johancifuentes@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0003-0474-9820>

Citation: Cifuentes Castellanos, J. M. (2025). Uso de microalgas en la industria química de Colombia: una revisión. *Mutis*, 15(1), 1- 25.
<https://doi.org/10.21789/22561498.2140>

Recibido: 5 de diciembre de 2024
Aceptado: 10 de febrero de 2025

Copyright: © 2025 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

Las microalgas, microorganismos fotosintéticos fundamentales en los ecosistemas acuáticos, destacan por su capacidad de realizar fotosíntesis oxigénica, equilibrar el oxígeno y promover el flujo energético. Su rápido crecimiento, alta adaptabilidad, elevado contenido lipídico y capacidad de fijar carbono han despertado un interés creciente en las últimas décadas, con la identificación de cerca de 100,000 especies distribuidas globalmente. Históricamente han sido utilizadas como alimento y en aplicaciones terapéuticas desde hace más de 2000 años. Actualmente se reconocen como fuentes de compuestos bioactivos, incluyendo ácidos grasos poliinsaturados, carotenoides y vitaminas, con amplias aplicaciones en las industrias alimenticia, cosmética, energética y de salud. Este estudio revisó 53 artículos indexados en Scopus y Publindex publicados entre el 2012 y el 2024, clasificando las aplicaciones de las microalgas en la industria química colombiana en áreas como farmacéutica, biofertilizantes, biorremediación, nutrición y biocombustibles. Se identificaron las clases Chlorophyceae, Trebouxiophyceae y Cyanophyceae como las más estudiadas, especialmente los géneros *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp. y *Arthrospira* sp. Las principales aplicaciones se concentran en la biorremediación de aguas y la producción de biocombustibles, destacando los departamentos de Antioquia y Norte de Santander como los más relevantes. Finalmente, se subraya la necesidad de profundizar en estudios a nivel de especie y avanzar en investigaciones bajo condiciones de campo. También se resalta la importancia de fortalecer áreas como las aplicaciones farmacéuticas y biomédicas, biofertilizantes y nutrición humana y animal, para maximizar el potencial de las microalgas en el contexto de la alta biodiversidad colombiana.

Palabras clave: bioprospección; biotecnología; algas; ficología; bioproceso; ciencias naturales.

ABSTRACT

Microalgae, photosynthetic microorganisms fundamental to aquatic ecosystems, are remarkable for their ability to perform oxygenic photosynthesis, regulate oxygen levels, and drive energy flow. Their rapid growth, high adaptability, significant lipid content, and carbon fixation capacity have generated increasing interest in recent decades, leading to the identification of nearly 100,000 species distributed worldwide. Historically used as food and in therapeutic applications for over 2,000 years, microalgae are now recognized as valuable sources of bioactive compounds—such as polyunsaturated fatty acids, carotenoids, and vitamins—with

diverse applications across the food, cosmetics, energy, and healthcare industries. This study reviewed 53 articles indexed in Scopus and Pubindex between 2012 and 2024, classifying the applications of microalgae in the Colombian chemical industry across sectors such as pharmaceuticals, biofertilizers, bioremediation, nutrition, and biofuels. The most frequently studied classes were *Chlorophyceae*, *Trebouxiophyceae*, and *Cyanophyceae*, particularly the genera *Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp., and *Arthrospira* sp. The primary applications identified were in water bioremediation and biofuel production, with the departments of Antioquia and Norte de Santander emerging as the most active regions in related research. The study highlights the need for further research at the species level and the importance of advancing it under real-world field conditions. Additionally, it underscores the potential for growth in pharmaceutical and biomedical applications, biofertilizers, and human and animal nutrition, in order to fully harness the potential of microalgae within Colombia's highly biodiverse context.

Keywords: Bioprospecting; Biotechnology; Algae; Phycology; Bioprocessing; Natural sciences.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son microorganismos que contienen clorofila u otro tipo de pigmento fotosintético y que son capaces de realizar fotosíntesis oxigénica (Luna, 2007). Su importancia radica en la contribución al balance de oxígeno y al inicio del flujo de energía que realizan en los sistemas acuáticos.

En las últimas décadas han despertado bastante interés debido a su rápido crecimiento, su alto contenido lipídico, el poco espacio que necesitan para su desarrollo, su alta capacidad para fijar carbono (Cristi, 2007) y su alta adaptabilidad, lo que ha llevado a la identificación de cerca de 100.000 especies y su distribución en prácticamente todos los ambientes del mundo (Guiry et al., 2014).

Los primeros registros de uso de estos microorganismos datan de hace aproximadamente 2000 años, cuando los chinos usaron el género *Nostoc* sp. como alimento en épocas de hambruna; posteriormente, *Chlorella* sp. fue usada en el tratamiento de pacientes con lepra y durante la Segunda Guerra Mundial los japoneses empezaron su cultivo como respuesta al déficit de alimentos, desarrollando varios productos enriquecidos con estas (Burja & Radianingtyas, 2008; Rani et al., 2018). Esto gracias a que son una fuente rica de compuestos con actividad biológica, como ácidos grasos polisaturados, carotenoides, ficobilinas, péptidos y polisacáridos; y de vitaminas A, B1, B2 y B12 (Sathasivam et al., 2019).

Dentro de los países con mayor producción de microalgas se encuentran Chi-na, India, Taiwan, Alemania y algunos de Latinoamérica. Los géneros que más se producen son: *Arthrospira* (comercialmente conocida como *Spirulina*) y *Chlorella*, con aproximadamente 12000 y 5000 toneladas de producción al año respectivamente y en décadas recientes también se han empezado a estudiar y producir biomasa de los géneros *Haematococcus*, *Dunaliella*, *Botryococcus*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Chaetoceros*, *Cryptocodinium*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nitzschia*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis*, y *Skeletonema* (Rani et al., 2018; Chen et al., 2016; Slocombe et al., 2016; Sathasivam et al., 2019).

El uso de las microalgas es muy variado, destacándose su aprovechamiento en la generación de energías alternativas como la producción de biodiesel y otros biocombustibles, frente a lo cual aún falta mucha investigación que permita desarrollarlo como una práctica económica y ambientalmente sostenible (Luna, 2007; Orozco et al., 2020). Gracias a que posee proteínas, lípidos esenciales, pigmentos, carbohidratos, minerales y vitaminas se usa en la industria alimenticia (con mayor peso en el ámbito animal, acuicultura), en la industria cosmética (cremas antiarrugas, protectores solares, etc.), y salud. Por otro lado, debido a su alta capacidad de fijar CO₂, es utilizada en procesos de mejora de la sostenibilidad ambiental, como biofertilizante y en el tratamiento de aguas residuales, gracias a que utiliza como insumo de crecimiento muchos de los compuestos que son contaminantes, eliminándolos así del agua y del suelo (Luna, 2007; Orozco et al., 2020).

En Colombia, los mayores reportes de uso se presentan hacia la costa Caribe, como alimento en sistemas de producción acuícola (Gutiérrez et al., 2017; Carrera et al., 2018). En el sector industrial, se trabaja en la obtención de biodiesel (Bermúdez, 2012; Tejada et al., 2015) y en el sector de alimentos como suplementos dietarios orientados a la prevención de enfermedades y a la mejora de las condiciones de salud (Hernández y Labbé, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, sumado a la alta diversidad ambiental y biológica de Colombia, el objetivo de esta investigación fue analizar el uso de las microalgas en la industria química en Colombia, clasificado en aplicaciones farmacéuticas y biomédicas, biofertilizantes, biorremediación de aguas, nutrición humana y animal, y producción de biocombustibles, a partir de una revisión bibliográfica, de 53 artículos que fueron seleccionados por estar publicados en revistas indexadas en las fuentes Scopus y Publiindex entre el 2012 y el 2024, y reportar el uso de microalgas para Colombia de manera puntual.

MICROALGAS REPORTADAS A NIVEL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA EN COLOMBIA

La revisión de la información permitió identificar que el reporte de microalgas a nivel de uso y potencial de uso en Colombia entre el 2012 y el 2024 se organiza a nivel de clase, género y especie de la siguiente manera:

- 13 clases
- 54 géneros de los cuales se ha realizado la identificación a
- 37 especies.

Las tres clases más reportadas son Chrophyceae, con un total de 43 reportes, seguido de Trebouxiophyceae con 31 reportes y Cyanophyceae con 20. Por el contrario, las que menos reportes tienen son Chlorodendrophyceae, Coccolithophyceae, Eustigmatophyceae y Pavlovophyceae con un reporte para cada una.

Dentro de la clase Chrophyceae, el género más reportado es *Scenedesmus* sp., con un total de 18 registros. Para la clase Trebouxiophyceae, el género más reportado es *Chlorella* sp. con una total de 31 registros; por último, para la clase Cyanophyceae, el género más reportado es *Arthrospira* sp. con un total de 4 registros.

A nivel de especie es importante precisar que el 62 % de los reportes encontrados solo llegan a nivel de género, por lo cual, el reporte de especies a nivel de Colombia es bajo, lo cual plantea una necesidad de avance a nivel de investigación. Dentro de las especies con más investigaciones está *Chlorella vulgaris*, que tiene un total de 8 reportes (Tabla 1).

Tabla 1. Relación de microalgas reportadas en Colombia a nivel de uso y potencial de uso, teniendo en cuenta clase, género y especie.

Clase	Género	Especie	Referencia
Bacillariophyceae	<i>Chaetoceros</i>	<i>C. calcitrans</i>	Acosta et al., 2021
	<i>Encyonopsis</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016.
	<i>Gomphonema</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016.
	<i>Navicula</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016.
	<i>Nitzschia</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016.
	<i>Pinnularia</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016.
Chlorodendrophyceae	<i>Tetraselmis</i>	<i>T. chuii</i>	Acosta et al., 2021
Chrophyceae	<i>Acutodesmus</i>	<i>A. obliquus</i>	Hurtado et al., 2019
	<i>Ankistrodesmus</i>	No se reporta	Devia et al., 2017
	<i>Chlamydomonas</i>	<i>C. reinhardtii</i>	Mora et al., 2019
		No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Sardi et al., 2016
	<i>Chlorococcum</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a
	<i>Coelastrum</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023
	<i>Desmodesmus</i>	<i>D. serratus</i>	Jiménez et al., 2020
		No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Gutiérrez et al., 2022b; Jaimes et al., 2012
	<i>Dunaliella</i>	<i>D. salina</i>	Tejeda et al., 2015; Gallego, Castillo & Martínez, 2019
	<i>Golenkinia</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Gonium</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a
	<i>Haematococcus</i>	<i>H. pluvialis</i>	Niño et al., 2017; Miranda et al., 2019; Wilczynski et al., 2021
		No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a
	<i>Monoraphidium</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023
	<i>Oedogonium</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Pandorina</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Radiococcus</i>	<i>R. nimbatius</i>	Jiménez et al., 2020
	<i>Scenedesmus</i>	<i>S. acuminatus</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. acutus</i>	Ardila, Godoy & Montenegro, 2017
		<i>S. apiculatus</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. denticulatus</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. dimorphus</i>	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Jiménez et al., 2020
		<i>S. javanensis</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. obliquus</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>S. praetervisus</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. protuberans</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>S. quadricauda</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Gutiérrez et al., 2022b; Silva et al., 2016; Devia et al., 2017; Leal et al., 2017; Guarín et al., 2020; Sardi et al., 2016.
	<i>Selenastrum</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Sardi et al., 2016
Coccolithophyceae	<i>Isochrysis</i>	<i>I. galbana</i>	Acosta et al., 2021

Cryptophyceae	<i>Chilomonas</i>	<i>C. insignis</i>	Sardi et al., 2016
	<i>Chroomonas</i>	<i>C. coerulea</i>	Sardi et al., 2016
	<i>Cryptomonas</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
Cyanophyceae	<i>Arthrospira</i>	<i>A. maxima</i>	Colorado & Moreno, 2017; Wilczynski et al., 2021
		<i>A. platensis</i>	Kang et al., 2022
		No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Chroococcus</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Vidal, Benítez & Vanegas, 2018; Sardi et al., 2016
	<i>Cyanobium</i>	<i>C. gracile</i>	Salazar et al., 2020
	<i>Dolichospermum</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Gloeocapsa</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Microcystis</i>	<i>M. aeruginosa</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		No se reporta	Salazar et al., 2020
	<i>Oscillatoria</i>	<i>O. amphibia</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>O. limosa</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Phormidium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	<i>Pseudoanabaena</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	<i>Spirulina</i>	<i>S. maxima</i>	Ortíz, Romero & Meza, 2018
		<i>S. platensis</i>	Ortíz, Romero & Meza, 2018
	<i>Synechococcus</i>	<i>S. rubescens</i>	Salazar et al., 2020
Dinophyceae	<i>Cryptocodinium</i>	<i>C. cohnii</i>	Gómez et al., 2020
Euglenophyceae	<i>Cryptoglena</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
	<i>Euglena</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	<i>Lepocinclis</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
	<i>Phacus</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	<i>Trachelomonas</i>	No se reporta	Devia et al., 2017
Eustigmatophyceae	<i>Nannochloropsis</i>	<i>N. oculata</i>	Acosta et al., 2021
Pavlovophyceae	<i>Pavlova</i>	No se reporta	Acosta et al., 2021
Trebouxiophyceae	<i>Botryococcus</i>	<i>B. braunii</i>	Calderon, Bayona & Garcés, 2018
	<i>Chlorella</i>	<i>C. sorokiniana</i>	Ortíz et al., 2012
		<i>C. vulgaris</i>	Baldiris et al., 2018; Quintero et al., 2016; Ardila, Godoy & Montenegro, 2017; Ortiz, Romero & Meza, 2018; Sandoval et al., 2018; García et al., 2021; Ardila et al., 2017; Sardi et al., 2016.
		No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Hernández, Pérez & Vitola, 2018; Vacca et al., 2017; Angulo et al., 2017; Santos & González, 2019; Devia et al., 2017; Ortiz et al., 2019; Tejeda et al., 2015; Ossa, Gómez & Peñuela, 2022; Urbina et al., 2021a; Oviedo et al., 2019; Vidal, Benítez & Vanegas, 2018; Leal et al., 2017; Urbina et al., 2021b; Rangel et al., 2018; Infante et al., 2013; Pardo et al., 2013; Jaimes et al., 2012
	<i>Golenkiniopsis</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a
	<i>Parachlorella</i>	<i>P. kessleri</i>	Jiménez et al., 2020
Ulvophyceae	<i>Ulothrix</i>	No se reporta	Devia et al., 2017; Sardi et al., 2016
Zygnematophyceae	<i>Closterium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	<i>Cosmarium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	<i>Spirogyra</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018

Fuente: elaboración propia.

USO DE LAS MICROALGAS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA EN COLOMBIA

El uso reportado para las microalgas fue clasificado en cinco grandes componentes:

Aplicaciones farmacéuticas y biomédicas: dentro de esta se contempla lo relacionado a la **producción de compuestos** como ácidos grasos poliinsaturados, los cuales son utilizados para la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer y asegurar el correcto funcionamiento del cerebro (Herrera et al., 2006). En este componente se reporta el uso de *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp., donde se evaluó la producción de ácido oleico, ácido palmitoleico, ácido araquídico, ácido linoleico, ácido palmítico, ácido linolénico, ácido erúxico y ácido esteárico, identificando una mayor producción en condiciones heterotróficas de la cepa de *Chlorella* sp (Leal et al., 2017).

En este componente se resalta el uso de la clase Chlorophyceae, especialmente con los géneros *Scenedesmus* sp. y *Haematococcus* sp. (Tabla 2).

Biofertilizantes: Dentro de esta categoría se contempla una revisión bibliográfica sobre el uso de microalgas en la industria agrícola realizada por Ortiz et al., (2019), en donde se evaluó a *Chlorella* como **potencial biofertilizante**, encontrándose que esta microalga tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de plantas de arroz (Rajasekaran et al., 2015), tomate (Özdemir, Sukatar & Öztekin, 2016), quimbombó (Agwa, Ogugbue & Williams, 2017), fresa (Kim et al., 2014) y uva (Bileva, 2013). Por otro lado, Vidal, Benítez & Vanegas (2018) evaluaron el uso de *Oscillatoria amphibia* en la fertilización de arroz, frijol y maíz, encontrando que los rendimientos generados fueron muy similares a los tratamientos con fertilización nitrogenada. Por su parte, Salazar et al., (2020) evaluaron a *Microcystis aeruginosa* en plantas de gulupa, encontrando que generan un incremento en el crecimiento de estas.

En este componente se resalta el uso de las clases Cyanophyceae y Trebouxiophyceae, especialmente el género *Chlorella* sp. en esta última (Tabla 2).

Biorremediación de aguas: en esta categoría se incluye el uso de microalgas para el tratamiento de aguas contaminadas con **fármacos**, logrando una remoción entre el 50 % y el 70 % de ibuprofeno y diclofenaco, entre el 30 % y el 70 % de gabapentina, lamotrigina, fenofibrato, gemfibrocil, diclofenalco, ketoprofeno, naproxeno, pentoxifilina y menos del 30 % para carbamacepina y CBZ diol, mediante el uso de *Parachlorella kessleri*, *Desmodesmus serratus*, *Scenedesmus denticulatus*, *Scenedesmus dimorphus*, *Scenedesmus acuminatus*, *Scenedesmus protuberans*, *Scenedesmus javanensis*, *Scenedesmus apiculatus*, *Scenedesmus praetervisus*, *Closterium* sp., *Radiococcus nimbatus*, *Phacus* sp., *Euglena* sp., *Encyonopsis* sp., *Pinnularia* sp., *Cryptomonas* sp., *Cosmarium* sp. y *Phormidium* sp. (Jiménez et al., 2022; Jiménez et al., 2020). Remoción y biodegradación de **fenoles**, donde se logró la reducción de estos en más del 75 %, usando *Chlorella vulgaris* y de más del 50 % usando *Chlamydomonas reinhardtii* en consorcio con bacterias (Baldiris et al., 2018; Mora et al., 2019). Inmovilización de **mercurio y níquel** de más del 90 % con *Chlorella* sp. (Hernández, Pérez & Vitola, 2018). **Decoloración de agua** residual de origen textil y de la industria de pinturas, donde se logró una remoción superior al 97 % de colorante de uso textil y del 86 % de la industria de pinturas, además de una mejoría en las características del agua como DBO del 95 %, DQO del 94 %, remoción de nitratos del 98 % y de fosfatos del 65 % con el uso de *Chlorella* sp. (Vacca et al., 2017;

Angulo et al., 2017). Remoción de **metales pesados** en aguas residuales de la industria textil logrando la reducción de aluminio de más del 88 %, cromo de más del 85 %, nitratos de más del 99 %, adicionalmente con una disminución de la carga orgánica del 25 %, mediante el uso de *Scenedesmus* sp. (Silva et al., 2016). Remoción de hasta un 85 % de cobre en aguas residuales de curtiembres con el uso *Chlorella vulgaris* (Ardila, Godoy & Montenegro, 2017). Remoción de **nitratos** superior al 86 %, **nitritos** superior al 80 %, **fosfatos** superior al 90 % y **amonios** superior al 65 %, en lagunas y granjas experimentales, mediante el uso de *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis* y *Spirulina maxima*, adicionalmente se logró la remoción de la turbidez en un 90 %, disminuir la DQO en un 85 % y la presencia de coliformes totales en un 87 % en humedales artificiales (Ortíz, Romero & Mesa, 2018; García et al., 2021; Urbina et al., 2022a; Infante et al., 2013). Remoción del 89 % de **solidos suspendidos** totales de aguas residuales de una PTAR con el uso de *Chlorella vulgaris* (Sandoval et al., 2018). Tratamiento de **drenajes ácidos** generados por actividades de minería, donde se logró la remoción del 95 % en términos de DQO y del 93 % de hierro (Devia et al., 2017). Eliminación de **cloruro** en agua, logrando una reducción del 40 % (Ramírez et al., 2017). Biorremediación de **lixiviados en rellenos sanitarios**, donde se identificó una disminución de la concentración de materia orgánica y un incremento en la presencia de nutrientes en el agua, relacionado a la presencia de *Chlamydomonas* sp., *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp., *Selenastrum* sp., *Ulothrix* sp., *Chilomonas insignis*, *Chroomonas coerulea*, *Cryptomonas* sp., *Chroococcus* sp., *Phormidium* sp., *Euglena* sp., *Cryptoglena* sp., *Lepocinclis* sp., *Phacus* sp., *Encyonopsis* sp., *Gomphonema* sp., *Navicula* sp., *Nitzschia* sp. y *Pinnularia* sp. (Sardi et al., 2016). Adicionalmente, se reporta el uso de consorcios microbiológicos que incluyen *Chlorella* sp. donde se obtuvo una mejora en las características fisicoquímicas del agua, incremento de otras poblaciones de microalgas, disminución de cianotoxinas y de especies de microorganismos contaminantes, disminución de BOD y remoción de nitratos (58 %), *Enterococcus* (92 %) y coliformes totales (100 %) (Gutiérrez et al., 2022a; Gutiérrez et al., 2023).

En este componente se resalta el uso de la clase Trebouxiophyceae, en donde el género *Chlorella* sp. es el más representativo, y la clase Chlorophyceae está representada por varias especies del género *Scenesmus* sp. (Tabla 2).

Nutrición humana y animal: en este componente se contempla la **producción de carotenoides**, los cuales han sido usados como estimuladores del sistema inmune y como tratamiento en enfermedades como cáncer, enfermedades cardíacas, neurodegenerativas, envejecimiento prematuro, artritis, hiperlipidemia e hipercolesterolemia (Emtyazjoo et al., 2012; Priyadarshani & Rath, 2012; Kumar, 2014). Gallego, Castillo & Martínez (2019) evaluaron el efecto del estrés en *Dunaliella salina*, donde identificaron que la modificación en el color e intensidad de la luz tiene efectos importantes en la producción de estos compuestos, por otro lado, Guarín et al., (2020) evaluaron a *Scenedesmus* sp y su capacidad de producción de carotenoides, logrando un incremento en su producción. También se ha investigado el uso de estos microorganismos como **complemento alimenticio**, al ser capaces de producir proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas, pigmentos y antioxidantes, en diferentes concentraciones; dentro de las especies reportadas se encuentra *Arthrospira maxima* (Colorado & Moreno, 2017). Se ha evaluado la producción y adición de aceite de la microalga *Cryptocodinium cohnii*, como aporte de ácido docosahexaenoico en mujeres gestantes (Gómez et al., 2020) y a *Arthrospira máxima* como adición en la producción de pan y barras de cereal (Wilczynski et al., 2020). Machado et al., (2021) evaluaron el potencial de las microalgas en los sistemas

alimentarios, encontrando posibles aplicaciones en la nutrición animal y humana, así como en la agricultura. A nivel de nutrición animal, se ha evaluado de manera específica el uso de *Chlorella* sp. como alimento de zooplancton que posteriormente fue usado en el proceso de desarrollo de peces, generando un aporte importante en el proceso de producción (Oviedo et al., 2019), adicionalmente se evaluó *Isochrysis galbana* como alimento para pepino de mar; sin embargo, se identificó que por sí sola no es capaz de cubrir los requerimientos nutricionales de esta especie (Acosta et al., 2021).

En este componente se resalta el uso de nueve clases, dentro de las cuales se reportan 10 géneros diferentes, sin que se logre evidenciar un género con más reportes que los otros (Tabla 2).

Producción de biocombustibles: en este componente se reporta el uso de especies de microalgas como *Acutodesmus obliquus*, para la **producción de lípidos** (palmítico, linolénico y linoleico) y el efecto de cambios en el color e intensidad de la luz sobre esta (Hurtado et al., 2019). Se ha evaluado la capacidad de *Chlorella* sp. para producir lípidos a partir de aguas residuales, donde se logró una producción de 178 mg/L (Santos & González, 2019). En la investigación realizada por Tejeda et al., (2015) se identificó que *Chlorella* sp. tiene la capacidad de producir un 40.23 % de lípidos mientras que *Dunaliella salina* logra una producción de 23.48 %. Ossa, Gómez & Peñuela, (2022) evaluaron la relación entre carbono/nitrógeno, encontrando que una relación 50/1 tiene mejores resultados en el contenido, producción y rendimiento de los lípidos, en *Chlorella sorokiniana*, así mismo Urbina et al., (2021a) encontraron un incremento en la producción de lípidos por parte de *Chlorella* sp., al ajustar las concentraciones de P y N. Rangel et al., (2018) evaluaron el efecto de la temperatura y la concentración de la enzima lipasa XX-25, identificando que la temperatura no generó ningún efecto, mientras la concentración de la enzima afecta la producción de lípidos en *Chlorella* sp. Jaimes et al., (2012) evaluaron la capacidad de crecimiento y producción de lípidos por parte de *Chlorella* sp y *Desmodesmus* sp, a partir de aguas residuales.

Por otro lado, se presentan investigaciones orientadas a simular la capacidad de Colombia de producir y usar microalgas, identificando potencial de producción en la Guajira, sin embargo, reportan la necesidad de analizar temas como el transporte de recursos y del producto (Kang et al., 2022). Duque (2017) evaluó la viabilidad de producción de microalgas en fotobioreactores en el Valle del Cauca, identificando una potencialidad a futuro. Rincón, Jaramillo & Cardona (2014) realizaron una simulación sobre la producción de biodiesel a partir de microalgas, en comparación con palma, jatropha y aceite de cocina, encontrando que las microalgas tienen una buena proyección de rendimiento. Correa et al., (2020), realizaron un modelo de producción de biocombustibles para Colombia, identificando que la Guajira y el valle del alto Magdalena son las zonas con mayor potencial de producción. Pardo et al., (2013) reportan que un sistema de extracción de aceites usando hexano, presenta una reducción en la generación de gases de efecto invernadero.

Otras investigaciones se orientan a mejorar el proceso de producción de lípidos y extracción de pigmentos (Quintero et al., 2016), producción de carbohidratos y de acetato de sodio (Ardila et al., 2017) y el uso de productos de desecho textil como matriz de crecimiento de *Botryococcus braunii*, lo que permitió incrementar la producción de biomasa (Calderón, Bayona & Garcés, 2018).

En este componente se resalta el uso de la clase Trebouxiophyceae, especialmente del género *Chlorella* sp. (Tabla 2).

Tabla 2. Clase, género y especie de microalgas reportadas por tipo de uso

Uso	Clase	Género	Especie	Referencia
Aplicaciones farmacéuticas y biomédicas	Chlorophyceae	<i>Haematococcus</i>	<i>H. pluvialis</i>	Niño et al., 2017; Miranda et al., 2019
		<i>Scenedesmus</i>	No se reporta	Leal et al., 2017; Guarín et al., 2020
	Trebouxiophyceae	<i>Chlorella</i>	No se reporta	Leal et al., 2017
Biofertilizante	Chlorophyceae	<i>Golenkinia</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Oedogonium</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Pandorina</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Scenedesmus</i>	<i>S. obliquus</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
			<i>S. quadri-cauda</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	Cyanophyceae	<i>Arthrospira</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Chroococcus</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Cyanobium</i>	<i>C. gracile</i>	Salazar et al., 2020
		<i>Dolichospermum</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Gloeocapsa</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Microcystis</i>	<i>M. aeruginosa</i>	Salazar et al., 2020
			No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Oscillatoria</i>	<i>O. amphibia</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
			<i>O. limosa</i>	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Pseudoanabaena</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
		<i>Synechococcus</i>	<i>S. rubescens</i>	Salazar et al., 2020
	Trebouxiophyceae	<i>Chlorella</i>	No se reporta	Ortiz et al., 2019; Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
	Zygnematophyceae	<i>Spirogyra</i>	No se reporta	Vidal, Benítez & Vanegas, 2018
Biorremediación de aguas	Bacillariophyceae	<i>Encyonopsis</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Gomphonema</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
		<i>Navicula</i>	No se reporta	Devia et al., 2017; Sardi et al., 2016
		<i>Nitzschia</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Pinnularia</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	Chlorophyceae	<i>Ankistrodesmus</i>	No se reporta	Devia et al., 2017
		<i>Chlamydomonas</i>	<i>C. reinhardtii</i>	Mora et al., 2019
			No se reporta	Gutiérrez et al., 2022b; Sardi et al., 2016
		<i>Coelastrum</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023
		<i>Desmodesmus</i>	<i>D. serratus</i>	Jiménez et al., 2020
			No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Gutiérrez et al., 2022b
		<i>Gonium</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022b
		<i>Haematococcaceae</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022b
		<i>Monoraphidium</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023
		<i>Radiococcus</i>	<i>R. nimbatus</i>	Jiménez et al., 2020
		<i>Scenedesmus</i>	<i>S. acuminatus</i>	Jiménez et al., 2020
			<i>S. acutus</i>	Ardila, Godoy & Montenegro, 2017
			<i>S. apiculatus</i>	Jiménez et al., 2020

			<i>S. denticulatus</i>	Jiménez et al., 2020
			<i>S. dimorphus</i>	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Jiménez et al., 2020
			<i>S. javanensis</i>	Jiménez et al., 2020
			<i>S. praetervisus</i>	Jiménez et al., 2020
			<i>S. protuberans</i>	Jiménez et al., 2020
			No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Gutiérrez et al., 2022b; Aranguren et al., 2022; Silva et al., 2016; Devia et al., 2017; Sardi et al., 2016
		<i>Selenastrum</i>	No se reporta	Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Sardi et al., 2016
		<i>Ulothrix</i>	No se reporta	Devia et al., 2017; Sardi et al., 2016
	Cryptophyceae	<i>Chilomonas</i>	<i>C. insignis</i>	Sardi et al., 2016
		<i>Chroococcus</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
		<i>Chroomonas</i>	<i>C. coerulea</i>	Sardi et al., 2016
		<i>Cryptomonas</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
	Cyanophyceae	<i>Chroococcus</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022b
		<i>Phormidium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Spirulina</i>	<i>S. maxima</i>	Ortíz, Romero & Meza, 2018
			<i>S. platensis</i>	Ortíz, Romero & Meza, 2018
	Euglenophyceae	<i>Cryptoglana</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
		<i>Euglena</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022b; Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Lepocinclis</i>	No se reporta	Sardi et al., 2016
		<i>Phacus</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Trachelomonas</i>	No se reporta	Devia et al., 2017
	Trebouxiophyceae	<i>Chlorella</i>	<i>C. vulgaris</i>	Baldiris et al., 2018; Ardila, Godoy & Montenegro, 2017; Ortíz, Romero & Meza, 2018; Sandoval et al., 2018; García et al., 2021; Sardi et al., 2016
			No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a; Gutiérrez, Sánchez & Gutiérrez, 2023; Hernández, Pérez & Vitola, 2018; Vacca et al., 2017; Angulo et al., 2017; Devia et al., 2017; Urbina et al., 2021a; Infante et al., 2013
		<i>Golenkiniopsis</i>	No se reporta	Gutiérrez et al., 2022a
		<i>Parachlorella</i>	<i>P. kessleri</i>	Jiménez et al., 2022; Jiménez et al., 2020
	Zygnematophyceae	<i>Cosmarium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
		<i>Closterium</i>	No se reporta	Jiménez et al., 2020; Sardi et al., 2016
Nutrición Humana y Animal	Bacillariophyceae	<i>Chaetoceros</i>	<i>C. calcitrans</i>	Acosta et al., 2021
	Coccolithophyceae	<i>Isochrysis</i>	<i>I. galbana</i>	Acosta et al., 2021
	Chlorophyceae	<i>Dunaliella</i>	<i>D. salina</i>	Gallego, Castillo & Martínez, 2019
		<i>Haematococcus</i>	<i>H. pluvialis</i>	Wilczynski et al., 2021
	Chlorodendrophyceae	<i>Tetraselmis</i>	<i>T. chuii</i>	Acosta et al., 2021
	Cyanophyceae	<i>Arthrospira</i>	<i>A. maxima</i>	Colorado & Moreno, 2017; Wilczynski et al., 2021
	Dinophyceae	<i>Cryptocodinium</i>	<i>C. cohnii</i>	Gómez et al., 2020
	Eustigmatophyceae	<i>Nannochloropsis</i>	<i>N. oculata</i>	Acosta et al., 2021
	Pavlovophyceae	<i>Pavlova</i>	No se reporta	Acosta et al., 2021
	Trebouxiophyceae	<i>Chlorella</i>	No se reporta	Oviedo et al., 2019
	Chlorophyceae	<i>Acutodesmus</i>	<i>A. obliquus</i>	Hurtado et al., 2019

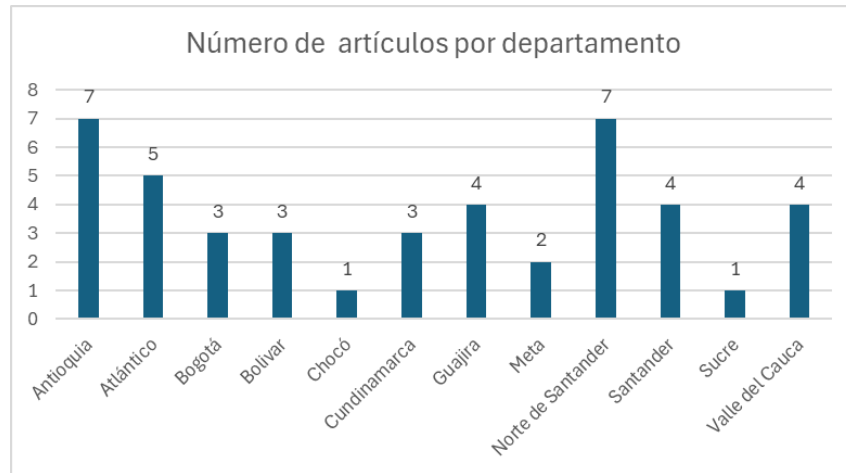
Producción de Biocombustibles		<i>Desmodesmus</i>	No se reporta	Jaimes et al., 2012
		<i>Dunaliella</i>	<i>D. salina</i>	Tejeda et al., 2015
	Trebouxiophyceae	<i>Botryococcus</i>	<i>B. braunii</i>	Calderon, Bayona & Garcés, 2018
		<i>Chlorella</i>	<i>C. sorokiniana</i>	Ossa, Gómez & Peñuela, 2022
			<i>C. vulgaris</i>	Quintero et al., 2016; Ardila et al., 2017
			No se reporta	Sántos & González, 2019; Tejeda et al., 2015; Urbina et al., 2021b; Rangel et al., 2018; Pardo et al., 2013; Jaimes et al., 2012

Fuente: elaboración propia

DEPARTAMENTO DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN

No todas las publicaciones indican el departamento en el cual se realizó la investigación, lo cual puede deberse a que la mayoría de estas corresponden a evaluaciones de condiciones de crecimiento y producción en laboratorio, sin necesariamente aplicarse a campo o a producción a mayor escala. Sin embargo, se tomó la ubicación de la institución que desarrolló el proceso con el fin de determinar dónde se están llevando a cabo más investigaciones sobre el tema. Antioquia y Norte de Santander, con siete publicaciones cada uno, lideran el grupo de departamentos en los cuales se está investigando el uso de las microalgas. Les siguen Atlántico con cinco artículos, y Guajira, Santander y Valle del Cauca con cuatro artículos cada uno (Figura 1).

Esta distribución puede responder a la presencia de necesidades específicas en estos departamentos que pueden ser resueltas por las microalgas, o a una proyección tanto de las instituciones que desarrollan las investigaciones como de los departamentos, en avanzar en temas de bioprospección y biotecnología. A pesar de que las microalgas tienen un amplio potencial, su estudio y uso se reduce a una parte muy pequeña del país, lo cual plantea una gran oportunidad a nivel de investigación para responder a los problemas y necesidades particulares de cada departamento.

Figura 1. Departamentos con reportes de investigaciones en microalgas.

Fuente: elaboración propia.

ENTIDADES QUE INVESTIGAN EN MICROALGAS

Se identificaron 57 instituciones a las cuales están adscritos los autores de los artículos. Estas se dividen en Instituciones de Educación Superior (IES) (73 %), Empresas (16 %), Centros de Investigación (9 %) y Centros de Desarrollo Tecnológico (2 %). El 74 % de los autores están ubicados en Colombia, mientras que el 26 % restante se encuentran en instituciones ubicadas en Alemania, Australia, Brasil, España, Estados Unidos, India, Corea, México y Suiza. La participación de autores de estos países puede deberse a colombianos vinculados a estas entidades que continúan realizando actividades de investigación con Colombia, o al interés de otros países por conocer y evaluar el uso de las microalgas en la industria química colombiana.

Se destaca la mayor participación de ciertas instituciones en el desarrollo y publicación de artículos relacionados con el tema, como la Universidad Francisco de Paula Santander (13 %), la Universidad de Cartagena (11 %), la Universidad Nacional de Colombia (11 %), el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) (9 %), la Universidad de los Andes (9 %), la Universidad Industrial de Santander (7 %) y la Universidad de Antioquia (7 %) (Tabla 3).

Tabla 3. Instituciones que realizan actividades de investigación relacionadas al uso de microalgas en Colombia.

Nombre de la institución	No artículos	Tipo de institución	Ubicación
Universidad Francisco de Paula Santander	7	IES	Colombia
Universidad de Cartagena	6	IES	Colombia
Universidad Nacional de Colombia	6	IES	Colombia
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA	5	IES	Colombia
Universidad de los Andes	5	IES	Colombia

Universidad de Antioquia	4	IES	Colombia
Universidad Industrial de Santander	4	IES	Colombia
Universidad del Atlántico	3	IES	Colombia
Universidad del Valle	3	IES	Colombia
Universidad Simón Bolívar	3	IES	Colombia
Algae Biosolutions S.A.S	2	Empresa	Colombia
Universidad Autónoma del Caribe	2	IES	Colombia
Universidad de la Sabana	2	IES	Colombia
Universidad de los Llanos	2	IES	Colombia
ACI Proyectos	1	Empresa	Colombia
Biodesign Swette Center for Environmental Biotechnology	1	Empresa	Estados Unidos
Cementos ARGOS	1	Empresa	Colombia
Centro de Investigaciones Energéticas España	1	Centro de Investigación	España
Corporación Centro de Excelencia en Ciencia Marina	1	IES	Colombia
LG Energy Solution	1	Empresa	Corea
Korea Advanced Institute of Science and Technology	1	IES	Corea
Algenol Biotech	1	Empresa	Estados Unidos
Fundación Terrazul	1	Centro Desarrollo Tecnológico	Colombia
Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco	1	IES	Colombia
Hada International	1	Empresa	Colombia
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	1	IES	Colombia
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia	1	IES	Colombia
ISAGEN	1	Empresa	Colombia
Leibniz Centre for Tropical Marine Research	1	Centro de Investigación	Alemania
Phycospectrum Environmental Research Centre	1	Centro de Investigación	India
Piscícola San Silvestre S.A	1	Empresa	Colombia
Georgia Institute of Technology	1	IES	Estados Unidos
The Mars Society	1	Centro de Investigación	Estados Unidos
Universidad Antonio Nariño	1	IES	Colombia
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca	1	IES	Colombia
Universidad de América	1	IES	Colombia
Universidad de Caldas	1	IES	Colombia
Universidad de Córdoba	1	IES	Colombia
Universidad de la Costa	1	IES	Colombia
Universidad de Pamplona	1	IES	Colombia
Universidad de Queensland	1	IES	Australia
Universidad de San Buenaventura	1	IES	Colombia
Universidad de Santander	1	IES	Colombia
Universidad de Sucre	1	IES	Colombia
Universidad de Zurich	1	IES	Suiza
Universidad del Magdalena	1	IES	Colombia
Universidad EAFIT	1	IES	Colombia
Universidad Federal de Paraná	1	IES	Brasil
Universidad Javeriana de Cali	1	IES	Colombia
Universidad Libre de Colombia	1	IES	Colombia
Universidad Nacional Abierta y a Distancia	1	IES	Colombia
Universidad Nacional Autónoma de México	1	IES	Colombia

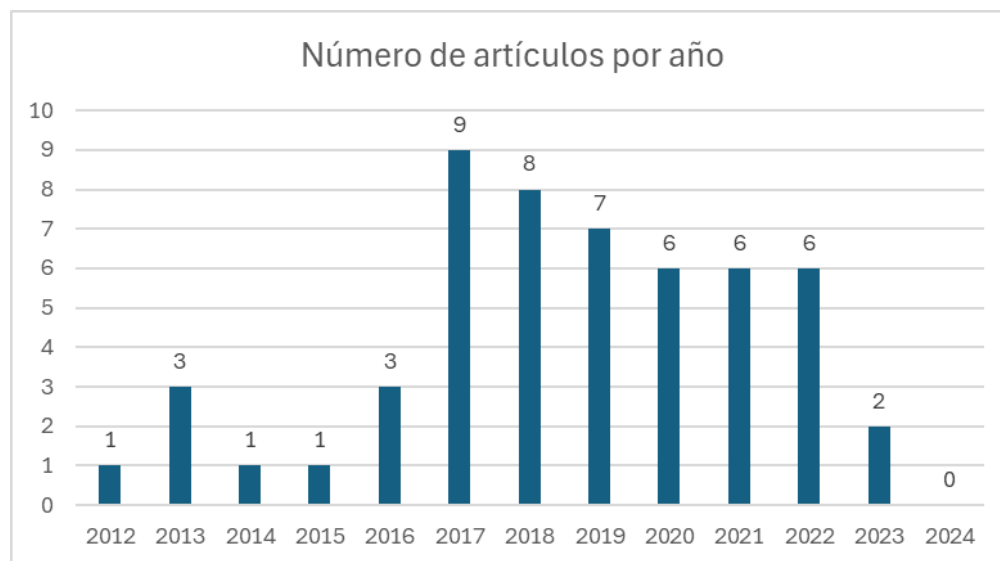
Universidad Pontificia Bolivariana	1	IES	Colombia
Universidad Sapienza	1	IES	Colombia
Universidad Sergio Arboleda	1	IES	Colombia
University Giessen	1	IES	Alemania
Vivekananda Institute of Algal Technology	1	Centro de Investigación	India

Fuente: elaboración propia.

AÑO DE PUBLICACIÓN

Se identificó que las investigaciones fueron publicadas entre 2012 y 2023, evidenciando que en los primeros cinco años el número de publicaciones fue bajo (máximo tres). Sin embargo, para 2017 el número de publicaciones incrementó hasta nueve, descendiendo levemente en los años siguientes hasta caer en 2023. Esta tendencia puede estar relacionada con un aumento del interés por el estudio y uso de microalgas entre 2016 y 2022, considerando que los resultados de los proyectos no siempre se publican el mismo año en que se finalizan. Es necesario evaluar en los próximos años la dinámica de publicaciones para entender si la disminución observada en 2023 y la ausencia en 2024 se deben a una pérdida de interés en el trabajo con microalgas o simplemente a una brecha en el proceso de publicación de los resultados de investigaciones con estos microorganismos (Figura 2).

Figura 2. Dinámica de publicación anual en Colombia sobre microalgas en la industria química.



Fuente: elaboración propia.

USO DE MICROALGAS FUERA DE COLOMBIA

El uso de microalgas fuera de Colombia muestra una amplia gama de aplicaciones industriales y ambientales. Algunos ejemplos son: *Pinnularia* que se utiliza en la producción de lípidos para biocombustibles y como alimento para especies como *Artemia* sp. (Arif et al., 2020; Castro et al., 2023), mientras que *Tetraselmis* es conocida por su capacidad de biorremediación y producción de biocombustibles debido a su tolerancia a la salinidad y acumulación de carbohidratos y lípidos (Mehariya et al., 2024; Dammak et al., 2024). *Scenedesmus* destaca por su producción de lípidos y proteínas, siendo utilizada en bioestimulantes agrícolas y suplementos alimenticios (Anand et al., 2021; Navarro et al., 2023; de Lima, Tonini & Ferreira, 2022). *Isochrysis* se emplea en acuicultura y producción de biocombustibles, además de tener aplicaciones nutraceuticas (Mendiola et al., 2014; Sani et al., 2021; Matos et al., 2019). *Cryptomonas* es valorada por su producción de ácidos grasos poliinsaturados y capacidad de absorción de metales pesados (Sharma et al., 2021). *Arthrospira* tiene múltiples usos, incluyendo nutrición humana y animal, medicina, y biorremediación (Gentscheva et al., 2023; Shao et al., 2019; Arahou et al., 2021; Abreu, Martins & Nunes, 2023). *Cryptocodinium* se utiliza en la industria farmacéutica y nutraceutica, así como en la producción de biocombustibles (Mutanda et al., 2020; Delgado, 2020). *Euglena* es conocida por sus aplicaciones en nutrición, farmacéutica y biorremediación (Glissibl et al., 2019; Lihanova et al., 2023). *Nannochloropsis* se destaca en la producción de biocombustibles y ácidos grasos omega-3, además de su capacidad de biorremediación (Ma et al., 2016; Ye et al., 2024; Mitrra & Mishra, 2019; Canini, Ceschi & Perozeni, 2024). *Pavlova* es investigada por su producción de fucoxantina, lípidos y biocombustibles, además de su uso en acuicultura (Fernandes & Cordeiro, 2022; Alvarez et al., 2017; Prasad et al., 2019). *Chlorella* es valorada por su alto contenido proteico y capacidad de biorremediación, además de su uso en la producción de biocombustibles (Liu & Chen, 2016). *Ulothrix* se usa principalmente en biorremediación debido a su capacidad de absorber metales pesados (Kulikova et al., 2018). Finalmente, *Closterium* se investiga para la producción de biodiesel (Saetang & Tipnee, 2021).

CONCLUSIONES

La diversidad de especies de microalgas reportadas en Colombia es alta, destacando la identificación de microalgas organizadas en 13 clases y 54 géneros. Sin embargo, un porcentaje significativo de estas identificaciones solo llega al nivel de género, evidenciando la necesidad de estudios más detallados a nivel de especie.

Las clases más reportadas en Colombia son Chlorophyceae, Trebouxiophyceae y Cyanophyceae, lo que sugiere una concentración de esfuerzos en estos grupos para aplicaciones industriales y de investigación.

Las microalgas en Colombia se utilizan principalmente en aplicaciones farmacéuticas y biomédicas, biofertilizantes, biorremediación de aguas, nutrición humana y animal, y producción de biocombustibles. Esto demuestra la versatilidad de estos microorganismos en distintos sectores de la industria.

Se observa un predominio en el uso de microalgas de los géneros *Chlorella* y *Scenedesmus* en aplicaciones como biorremediación de aguas y producción de biocombustibles, lo que resalta su importancia en la sostenibilidad ambiental y energética del país.

Existe un potencial de investigación y uso de las microalgas en Colombia, en áreas como la aplicaciones farmacéuticas y biomédicas, la biofertilización y la nutrición humana y animal las cuales, a pesar de presentar resultados, están muy por debajo del uso en biorremediación de aguas y en la producción de biocombustibles.

La mayor cantidad de investigaciones se realizan a nivel de IES y en condiciones de laboratorio, lo que evidencia una necesidad de la articulación con las empresas y el avance a investigaciones en campo o bajo condiciones más cercanas a las naturales, que permitan su uso en la resolución de las necesidades a mayor escala.

Existen oportunidades para expandir el uso de géneros como *Euglena* y *Nannochloropsis* en áreas como la producción de bioproductos y biocombustibles, lo que podría incrementar el aprovechamiento industrial de estos microorganismos en Colombia.

A pesar de que el país cuenta con condiciones ambientales para el desarrollo y uso de microalgas, el paso de investigaciones a nivel de laboratorio al uso a nivel industrial y productivo es uno de los mayores desafíos que se identifican, esto debido a las condiciones de producción tan específicas que se deben manejar, lo cual implica infraestructura y recursos para su correcta implementación.

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Tecnológica de Bogotá, quien financió esta investigación.

REFERENCIAS

Abreu, A. P., Martins, R., & Nunes, J. (2023). Emerging Applications of *Chlorella* sp. and *Spirulina* (Arthrospira) sp. *Bioengineering*, 10(8), 955. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10080955>

Acosta, E. J., Rodríguez-Forero, A., Werding, B., & Kunzmann, A. (2021). Effect of density, temperature and diet on the growth, survival and development of larvae and juveniles of *Isostichopus* sp. *Aquaculture Research*, 52(2), 611-624. <https://doi.org/10.1111/are.14918>

Agwa, O. K., Ogugbue, C. J., & Williams, E. E. (2017). Field Evidence of *Chlorella vulgaris* Potentials as a Biofertilizer for *Hibiscus esculentus*. *International Journal of Agricultural Research*, 12, 181-189. <https://doi.org/10.3923/ijar.2017.181.189>

Alvarez, P., Pérez, L., Salgueiro, J. L., Cancela, A., Sánchez, Á., & Ortiz, L. (2017). Bioenergy use from *Pavlova lutheri* microalgae. *International Journal of Environmental Research*, 11, 281-289. <https://doi.org/10.1007/s41742-017-0026-2>

Anand, V., Kashyap, M., Ghosh, A., Samadhiya, K., & Kiran, B. (2021). A strategy for lipid production in *Scenedesmus* sp. by multiple stresses induction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01392-2>

Angulo M, E., Castellar O, G., Cely B, M. M., Ibáñez S, L., & Prasca M, L. (2017). Discoloration of wastewater from a paint industry by the microalgae *Chlorella* sp. *Revista MVZ Córdoba*, 22(1), 5706-5717. <https://doi.org/10.21897/rmvz.930>

Arahou, F., Hassikou, R., Arahou, M., Rhazi, L., & Wahby, I. (2021). Influence of culture conditions on *Arthrospira platensis* growth and valorization of biomass as input for sustainable agriculture. *Aquaculture International*, 29(5), 2009-2020. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00730-5>

Aranguren Díaz, Y., Monterroza Martínez, E., Carillo García, L., Serrano, M. C., & Machado Sierra, E. (2022). Phycoremediation as a Strategy for the Recovery of Marsh and Wetland with Potential in Colombia. *Resources*, 11(2), 15. <https://doi.org/10.3390/resources11020015>

Ardila, L., Godoy, R., & Montenegro, L. (2017). Sorption capacity measurement of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* to remove chromium from tannery wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 83, No. 1, p. 012031). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/83/1/012031>

Ardila-Álvarez, A. M., López-Matos, Y., Vásquez-Cáceres, M. E., González-Delgado, Á. D., & Barajas-Solano, A. F. (2017). Obtaining lipids and carbohydrates from microalgae via design of selective culture media. *Tecnológicas*, 20(38), 83-94. <https://doi.org/10.22430/22565337.581>

Arif, M., Bai, Y., Usman, M., Jalalah, M., Harraz, F. A., Al-Assiri, M. S., ... & Zhang, C. (2020). Highest accumulated microalgal lipids (polar and non-polar) for biodiesel production with advanced wastewater treatment: role of lipidomics. *Bioresource technology*, 298, 122299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122299>

Baldiris, I., Sánchez, J., González, A., Realpe, A., Acevedo, A. (2018). Removal and biodegradation of phenol by the freshwater microalgae *Chlorella vulgaris*. *Contemporary Engineering Sciences*, 11, 1941 -1970. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.84201>

Bermúdez, S., & Miguel, L. (2012). Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel (Doctoral dissertation). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10636>

Bileva, T. (2013). Influence of green algae *Chlorella vulgaris* on infested with xiphinema index grape seedlings. *Journal Earth Science & Climatic Change*, 4(2), 136. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000136>

Burja, A. M., & Radianingtyas, H. (2008). Nutraceuticals and functional foods from marine microbes: an introduction to a diverse group of natural products isolated from marine macroalgae, microalgae, bacteria, fungi, and cyanobacteria. In *Marine nutraceuticals and functional foods* (pp. 367-403). <https://doi.org/10.1201/9781420015812.ch15>

Calderón, N. D. G., Bayona, K. C. D., & Garcés, L. A. (2018). Immobilization of the green microalga *Botryococcus braunii* in polyester wadding: effect on biomass, fatty acids, and exopolysaccharide production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.02.006>

Carrera, S., Velazco, L., & Barreto-Hernandez, A. (2018). Potential of benthic microalgae of the Caribbean sea as food in mariculture. *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*, 53(3), 321-333. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2018.53.3.1357>

Castro, M. J., Castro, M. G., Flores, G. A. F., Tinoco, L. P. I., & Salvat, N. K. A. (2023). *Artemia* sp. biomass production using three different microalgae (*Pinnularia* sp., *Porphyridium* sp., and *Dunaliella* sp.) with yeast supply. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 11, Issue 5, Part C. <https://doi.org/10.22271/fish.2023.v11.i5c.2864>

Canini, D., Ceschi, E., & Perozeni, F. (2024). Toward the Exploitation of Sustainable Green Factory: Biotechnology Use of *Nannochloropsis* spp. *Biology*, 13(5), 292. <https://doi.org/10.3390/biology13050292>

Chen, J., Wang, Y., Benemann, J. R., Zhang, X., Hu, H., & Qin, S. (2016). Microalgal industry in China: challenges and prospects. *Journal of applied phycology*, 28, 715-725. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0720-4>

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

Colorado-Gómez, M. A., & Moreno-Tirado, D. A. (2017). Economía de recursos naturales a partir de la producción de *Spirulina* (*Arthrospira maxima*) en fotobiorreactores, La Guajira, Colombia. *Retos*, 5, 50-59. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/RETO/article/view/1410>

Correa, D. F., Beyer, H. L., Possingham, H. P., García-Ulloa, J., Ghazoul, J., & Schenk, P. M. (2020). Freeing land from biofuel production through microalgal cultivation in the Neotropical region. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094094. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8d7f>

Dammak, M., Ben Hlima, H., Fendri, I., Smaoui, S., & Abdelkafi, S. (2024). Tetraselmis species for environmental sustainability: biology, water bioremediation, and biofuel production. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(36), 48864-48887. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34247-0>

De Lima, J. F., Tonini, J., & Ferreira-Camargo, L. S. (2022, November). *Scenedesmus* sp. Cultivation in a Synthetic Fertilizer-Based Culture Media: Biomass' Lipids and Proteins Profile. In *Interdisciplinary Conference on Innovation, Design, Entrepreneurship, And Sustainable Systems* (pp. 162-171). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-29129-6_15

Delgado Tejera, C. (2020). Uso de microalgas en la industria farmacéutica. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21691>

Devia Torres, D., Cáceres Sepúlveda, S., Roa, A. L., Suárez Gelvez, J. H., & Urbina Suárez, N. A. (2017). Utilización de microalgas de la división Chlorophyta en el tratamiento biológico de drenajes ácidos de minas de carbón. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(2), 95-104. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n2.70429>

Duque, J. L. R. (2017). Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 127-140. <https://doi.org/10.22490/21456453.2039>

Emtyazjoo, M., Moghadasi, Z., Rabbani, M., Emtyazjoo, M., Samadi, S., & Mossaffa, N. (2012). Anticancer effect of *Dunaliella salina* under stress and normal conditions against skin carcinoma cell line A431 in vitro. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 11(2), 283-293. <http://jifro.ir/article-1-527-en.html>

Fernandes, T., & Cordeiro, N. (2022). High-value lipids accumulation by *Pavlova pinguis* as a response to nitrogen-induced changes. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106341. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106341>

Gallego-Cartagena, E., Castillo-Ramírez, M., & Martínez-Burgos, W. (2019). Effect of stressful conditions on the carotenogenic activity of a Colombian strain of *Dunaliella salina*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1325-1330. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.07.010>

García, K. L. Q., Zúñiga, D. P. R., Duque, M. E. G., & Rojas, J. A. A. (2021). Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. *Ingeniería y Región*, 25, 82-94. <https://doi.org/10.25054/22161325.2921>

Gentscheva, G., Nikolova, K., Panayotova, V., Peycheva, K., Makedonski, L., Slavov, P., ... & Yotkovska, I. (2023). Application of *Arthrospira platensis* for medicinal purposes and the food industry: a review of the literature. *Life*, 13(3), 845. <https://doi.org/10.3390/life13030845>

Gissibl, A., Sun, A., Care, A., Nevalainen, H., & Sunna, A. (2019). Bioproducts from *Euglena gracilis*: synthesis and applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 108. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00108>

Gómez Ramírez, B. D., Sepúlveda Valencia, J. U., Alzate Arbelaez, A. F., Herrera, J. M., & Rojano, B. A. (2020). Evaluación oxidativa, microbiológica, sensorial y perfil de ácidos grasos de un yogur con ácido docosahexaenoico (DHA) extraído de aceite de microalgas. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(4), 568-579. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000400568>

Guarin-Villegas, E., Remolina-Páez, L. M., Bermúdez-Castro, J. P., Mogollón-Londoño, S. O., Contreras-Roperio, J. E., García-Martínez, J. B., & Barajas-Solano, A. F. (2020). Effect of carbon/Nitrogen ratio on the production of microalgae-based carotenoids. *Ingeniería y competitividad*, 22(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v22vi1i.8686>

Guiry, M. D., Guiry, G. M., Morrison, L., Rindi, F., Miranda, S. V., Mathieson, A. C., ... & Garbary, D. J. (2014). AlgaeBase: an on-line resource for algae. *Cryptogamie, Algologie*, 35(2), 105-115. <https://doi.org/10.7872/crya.v35.iss2.2014.105>

Gutiérrez, J. E., Gutiérrez-Hoyos, N., Gutiérrez Benedetti, J. S., Vives, M. J., & Sivasubramanian, V. (2022a). Clarification of cyanotoxins in El Guajaro Reservoir, Colombia using a microalgae-based consortium MPMC. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(6), 1468-1481. <https://doi.org/10.1002/jctb.7016>

Gutiérrez, J. E., Gutiérrez-Hoyos, N., Gutiérrez, J. S., Vives, M. J., & Sivasubramanian, V. (2022b). Bioremediation of a sewage-contaminated tropical swamp through bioaugmentation with a microalgae-predominant microbial consortium. *Indian Journal of Microbiology*, 62(2), 307-311. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00990-y>

Gutiérrez-Hoyos, N., Sánchez, C., & Gutiérrez, J. E. (2023). Variation in phytoplankton diversity during phycoremediation in a polluted Colombian Caribbean swamp. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2), 327. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10843-w>

Gutiérrez, M. F. P., Romero, G. A. J., Barros, A. D., & Ruiz, J. R. (2017). Cultivo de microalgas *Isochrysis galbana* y *Nannochloropsis* sp. para alimentación de larvas de peces marinos. *Revista Mutis*, 7(2), 75-80. <https://doi.org/10.21789/22561498.1246>

Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>.

Hernández, Y., Pérez, A., Vitola., D. (2018). Biosorption of Mercury and Nickel in Vitro by Microalga *Chlorella* sp. in Solution and Immobilized in Dry Fruit of Squash (*Luffa Cylindrica*). *Indian Journal of Science and Technology*, 11 (41), 1-7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i41/131111>

Herrera, M. C., y León, S. V., Tolentino, R. G., Fernández, B. G., & González, G. D. (2006). Los ácidos grasos omega-3 y omega-6: nutrición, bioquímica y salud. *Revista de educación bioquímica*, 25(3), 72-79. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=40260>

Hurtado, D. X., Garzón-Castro, C. L., Cortés-Romero, J., & Tello, E. (2019). Using different wavelengths and irradiance on the microalgae *Acutodesmus obliquus* batch culture. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94(7), 2141-2147. <http://hdl.handle.net/10818/48375>

Infante, C., León, I., Florez, J., Zárate, A., Barrios, F., & Zapata, C. (2013). Removal of ammonium and phosphate ions from wastewater samples by immobilized *Chlorella* sp. *International journal of environmental studies*, 70(1), 1-7. <https://doi.org/10.1080/00207233.2012.742643>

Jaimes-Duarte, D. L., Soler-Mendoza, W., Velasco-Mendoza, J., Muñoz-Peñaloza, Y., & Urbina-Suárez, N. A. (2012). Characterization Chlorophytes microalgae with potential in the production of lipids for biofuels. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(1), 93-102. <https://doi.org/10.29047/issn.0122-5383>

Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., Ortiz-Escobar, A. C., Morales-Acosta, P. A., Peña-Salamanca, E. J., & Machuca-Martínez, F. (2020). High-rate algal pond for removal of pharmaceutical compounds from urban domestic wastewater under tropical conditions. Case study: Santiago de Cali, Colombia. *Water Science and Technology*, 82(6), 1031-1043. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.362>

Jiménez-Bambague, E. M., Florez-Castillo, J. S., Gómez-Angulo, R. D., Morales-Acosta, P. A., Peña-Salamanca, E. J., Machuca-Martínez, F., & Madera-Parra, C. A. (2022). Cell growth and removal capacity of ibuprofen and diclofenac by *Parachlorella kessleri* at bench scale. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(6), 1416-1423. <https://doi.org/10.1002/jctb.6911>

Kang, S., Realff, M. J., Yuan, Y., Chance, R., & Lee, J. H. (2022). Global evaluation of economics of microalgae-based biofuel supply chain using GIS-based framework. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39(6), 1524-1541. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-1053-4>

Kim, M. J., Shim, C. K., Kim, Y. K., Park, J. H., Hong, S. J., Ji, H. J., ... & Yoon, J. C. (2014). Effect of *Chlorella vulgaris* CHK0008 fertilization on enhancement of storage and freshness in organic strawberry and leaf vegetables. *Horticultural Science & Technology*, 32(6), 872-878. <https://doi.org/10.7235/hort.2014.14107>

Kulikova, N. N., Volkova, E. A., Bondarenko, N. A., Chebykin, E. P., Saibatalova, E. V., Timoshkin, O. A., & Suturin, A. N. (2018). Element composition and biogeochemical functions of algae *Ulothrix zonata* (F. Weber et Mohr) Kützinger in the coastal zone of the Southern Baikal. *Water Resources*, 45, 908-919. <https://doi.org/10.1134/S0097807818060106>

Kumar, M. A. H. E. P. (2014). Harvesting of valuable eno-and exo-metabolites form cyanobacteria: a potential source. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 7, 24-28. <https://journals.innovareacademics.in/index.php/ajpcr/article/view/858>.

Leal Medina, G. I., Abril Bonett, J. E., Martínez Gélvez, S. J., Muñoz Peñaloza, Y. A., Peñaranda Lizarazo, E. M., & Urbina Suárez, N. A. (2017). Producción de ácidos grasos poliinsaturados a partir de biomasa microalgal en un cultivo heterotrófico. *Revista Ion*, 30(1), 91-103. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017007>

Lihanová, D., Lukáčová, A., Beck, T., Jedlička, A., Vešelényiová, D., Krajčovič, J., & Vesteg, M. (2023). Versatile biotechnological applications of *Euglena gracilis*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(5), 133. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03585-5>

Liu, J., & Chen, F. (2016). Biology and industrial applications of *Chlorella*: advances and prospects. *Microalgae biotechnology*, 1-35. https://doi.org/10.1007/10_2014_286

Luna, L. M. G. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista cubana de química*, 19(2), 3-20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543707001>

Ma, X. N., Chen, T. P., Yang, B., Liu, J., & Chen, F. (2016). Lipid production from *Nannochloropsis*. *Marine drugs*, 14(4), 61. <https://doi.org/10.3390/md14040061>

Machado Sierra, E., Serrano, M. C., Manares, A., Guerra, A., & Aranguren Díaz, Y. (2021). Microalgae: Potential for bioeconomy in food systems. *Applied Sciences*, 11(23), 11316. <https://doi.org/10.3390/app112311316>

Matos, J., Cardoso, C., Gomes, A., Campos, A. M., Falé, P., Afonso, C., & Bandarra, N. M. (2019). Bioprospection of *Isochrysis galbana* and its potential as a nutraceutical. *Food & function*, 10(11), 7333-7342. <https://doi.org/10.1039/C9FO01364D>.

Mehariya, S., Annamalai, S. N., Thaher, M. I., Quadir, M. A., Khan, S., Rahmanpoor, A., ... & Das, P. (2024). A comprehensive review on versatile microalga Tetraselmis: Potentials applications in wastewater remediation and bulk chemical production. *Journal of Environmental Management*, 365, 121520. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121520>

Mendiola, J. A., Sullini, G., Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2014). Optimization of supercritical fluid extraction processes to obtain bioactives from *Isochrysis galbana* microalga. <http://hdl.handle.net/10261/109509>

Miranda, A. M., Ossa, E. A., Vargas, G. J., & Sáez, A. A. (2019). Efecto de las Bajas Concentraciones de Nitratos y Fosfatos sobre la Acumulación de Astaxantina en *Haematococcus pluvialis* UTEX 2505. *Información tecnológica*, 30(1), 23-32. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000100023>.

Mitra, M., & Mishra, S. (2019). A biorefinery from *Nannochloropsis* spp. utilizing wastewater resources. *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*, 2, 123-145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13909-4_6

Mora-Salguero, D. A., Vives Florez, M. J., Husserl Orjuela, J., Fernández-Niño, M., & González Barrios, A. F. (2019). Evaluation of the phenol degradation capacity of microalgae-bacteria consortia from the bay of Cartagena, Colombia. *Tecnológicas*, 22(44), 149-158. <https://doi.org/10.22430/22565337.1179>

Mutanda, T., Naidoo, D., Bwapwa, J. K., & Anandraj, A. (2020). Biotechnological applications of microalgal oleaginous compounds: current trends on microalgal bioprocessing of products. *Frontiers in Energy Research*, 8, 598803. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.598803>

Navarro-López, E., Ruiz-Nieto, A., Gallardo-Rodríguez, J. J., Cerón-García, M. C., González-López, C. V., & Acién-Fernández, F. G. (2023). Downstream processing of *Scenedesmus* sp. to obtain biostimulants. *Journal of Applied Phycology*, 35(5), 2193-2203. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03039-3>

Niño-Castillo, C. M., Rodríguez-Rivera, F. C., Díaz, L. E., & Lancheros-Díaz, A. G. (2017). Evaluación de las condiciones de crecimiento celular para la producción de astaxantina a partir de la microalga *Haematococcus pluvialis*. *Nova*, 15(28), 19-31. <https://doi.org/10.22490/24629448.2073>

Orozco, M. C. A., Reyes, O. E. S., & Patiño, L. V. (2020). Perspectivas industriales en tecnologías de biofijación de CO₂ por microalgas. *Documentos De Trabajo ECAPMA*, 4(1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.3481>

Ortiz-Moreno, M. L., Cortés-Castillo, C. E., Sánchez-Villarraga, J., Padilla, J., & Otero-Paternina, A. M. (2012). Evaluación del crecimiento de la microalga *Chlorella sorokiniana* en diferentes medios de cultivo en condiciones autotróficas y mixotróficas. *Orinoquia*, 16(1), 11-20. <https://doi.org/10.22579/20112629.224>

Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A., & Meza-Rodríguez, L. D. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. *Revista de investigación, desarrollo e innovación*, 9(1), 163-176. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.8153>

Ortiz-Moreno, M. L., Sandoval-Parra, K. X., & Solarte-Murillo, L. V. (2019). *Chlorella*, ¿Un potencial biofertilizante? *Orinoquia*, 23(2), 71-78. <https://doi.org/10.22579/20112629.582>

Ossa, L. D., Andrea, C., Gómez-Vanegas, N. A., & Peñuela-Vásquez, M. (2022). Evaluation of the Carbon to Nitrogen and Carbon to Phosphorus ratios for improving the production of biomass and fatty acids in *Chlorella sorokiniana*. *Hidrobiológica*, 32(1), 25-31. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbh/hidro/2022v32n1/lugo>

Oviedo-Montiel, H. D., Herrera-Cruz, E. E., Hoya-Florez, J. K., Prieto-Guevara, M. J., Estrada-Posada, A. L., & Yepes-Blandón, J. A. (2019). Crecimiento poblacional de *Macrothrix spinosa* alimentada con *Chlorella* sp. *Orinoquia*, 23(2), 79-86. <https://doi.org/10.22579/20112629.571>

Özdemir, S., Sukatar, A., & Öztekin, G. B. (2016). Production of *Chlorella vulgaris* and its effects on plant growth, yield and fruit quality of organic tomato grown in greenhouse as biofertilizer. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(4), 596-605. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001418

Pardo-Cárdenas, Y., Herrera-Orozco, I., González-Delgado, Á. D., & Kafarov, V. (2013). Environmental assessment of microalgae biodiesel production in Colombia: comparison of three oil extraction systems. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(2), 85-100. <https://doi.org/10.29047/01225383.59>

Prasad, B., Lein, W., Lindenberger, C. P., Buchholz, R., & Vadakedath, N. (2019). An optimized method and a dominant selectable marker for genetic engineering of an industrially promising microalga—*Pavlova lutheri*. *Journal of Applied Phycology*, 31, 1163-1174. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1617-9>

Priyadarshani, I., & Rath, B. (2012). Commercial and industrial applications of micro algae—A review. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 3(4), 89-100. <https://doi.org/10.3390/md17060312>

Quintero, V., Valderrama, C., Ortiz, D., & Kafarov, V. (2016). Conceptual Framework for the Production of Bioethanol and Byproducts from Microalgae Biomass. *Chemical Engineering*, 49. <https://doi.org/10.3303/CET1649066>

Rajasekaran, S., Sundaramoorthy, P., & Sankar Ganesh, K. (2015). Effect of FYM, N, P fertilizers and biofertilizers on germination and growth of paddy (*Oryza sativa*. L). *International Letters of Natural Sciences*. 8. <https://doi.org/10.18052/WWW.SCI-PRESS.COM/ILNS.35.59>

Ramírez, M. E., Vélez, Y. H., Rendón, L., & Alzate, E. (2017). Potential of microalgae in the bioremediation of water with chloride content. *Brazilian Journal of Biology*, 78(03), 472-476. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.169372>

Rani, K., Sandal, N., & Sahoo, P. K. (2018). A comprehensive review on chlorella- its composition, health benefits, market and regulatory scenario. *The Pharma Innovation Journal*, 7(7), 584-589. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2018&vol=7&issue=7&ArticleId=2319>

Rangel-Basto, Y. A., García-Ochoa, I. E., Suarez-Gelvez, J. H., Zuorro, A., Barajas-Solano, A. F., & Urbina-Suarez, N. A. (2018). The effect of temperature and enzyme concentration in the transesterification process of synthetic microalgae oil. *Chemical Engineering Transactions*, 64, 331-336. <https://doi.org/10.3303/CET1864056>

Rincón, L. E., Jaramillo, J. J., & Cardona, C. A. (2014). Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, 69, 479-487. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.058>

Saetang, N., & Tipnee, S. (2021). Towards a sustainable approach for the development of biodiesel microalgae, *Closterium* sp. *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 3(1), 25-29. <https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i1.245114>

Sandoval, J., Malo, B., Cartagena, J., & Fernández, D. (2018). Laboratory evaluation of the organic matter removal capacity of *Chlorella vulgaris* in wastewater from the Salitre WWTP. *Revista Mutis*, 8(1), 34-42. <https://doi.org/10.21789/22561498.1368>

Sani, E. R. A., Yong, W. T. L., Chin, G. J. W. L., & Misson, M. (2021). Growth and Lipid Production of *Isochrysis galbana* in an Upscale Cultivation System. *Trans. Sci. Technol*, 8, 203-209. <http://tost.unise.org/pdfs/vol8/no3-2/ToST-CoFA202...>

Santos, J. A. G., & González, L. G. R. (2019). Obtención de biomasa de microalgas en aguas residuales para la producción de biocombustibles. *Revista RenovaT*, 21. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rnt/article/view/3470>

Salazar, C. A. G., Cardona, Y. A. P., Osorio, L. A. R., & Porras, L. M. M. (2020). Efecto de un Consorcio de cianobacterias sobre la obtención de biomasa vegetal de la gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* sims) bajo condiciones de campo en el municipio de Marinilla-Antioquia. *Hechos Microbiológicos*, 11(1 y 2), 12-21. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v11n1a02>

Sardi-Saavedra, A., Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., & Cerón-Hernández, V. A. (2016). Diversity of algal communities associated with a photosynthetic high rate algal system for bioremediation landfill leachate. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(1), 113-120. <https://doi.org/10.3856/vol44-issue1-fulltext-11>

Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2019). Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. *Saudi journal of biological sciences*, 26(4), 709-722. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.003>

Sharma, N., Simon, D. P., Diaz-Garza, A. M., Fantino, E., Messaabi, A., Meddeb-Mouelhi, F., ... & Desgagné-Penix, I. (2021). Diatoms biotechnology: various industrial applications for a greener tomorrow. *Frontiers in Marine Science*, 8, 636613. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.636613>

Shao, W., Ebaid, R., El-Sheekh, M., Abomohra, A., & Eladel, H. (2019). Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of *Spirulina* (Arthrospira): An overview. *Grasas y Aceites*, 70(1), e292-e292. <https://doi.org/10.3989/gya.0690181>

Silva, K. R. P., Bolaños, A. M. V., Rodríguez, L. C. H., Ospina, D. A. P., & Segura, M. Á. B. (2016). Uso de *Scenedesmus* para la remoción de metales pesados y nutrientes de aguas residuales para la industria textil. *Ingeniería solidaria*, 12(20), 95-105. <https://doi.org/10.16925/in.v19i20.1418>

Slocombe, S. P., Zhang, Q., Ross, M., Stanley, M. S., & Day, J. G. (2016). Screening and Improvement of marine microalgae for oil production. *Microalgal production for biomass and high-value products*, 91-113. <https://doi.org/10.1201/b19464>

Tejeda-Benítez, L., Henao-Argumedo, D., Alvear-Alayón, M., & Castillo-Saldarriaga, C. R. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Revista facultad de ingeniería*, 24(39), 43-54. <https://doi.org/10.19053/01211129.3550>

Urbina-Suarez, N. A., Barajas-Solano, A. F., Garcia-Martínez, J. B., López-Barrera, G. L., & González-Delgado, A. D. (2021a). Prospects for using wastewater from a farm for algae cultivation: The case of Eastern Colombia. *Journal of Water and Land Development*, 2022(52), 172-179. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140387>

Urbina-Suarez, N. A., García-Martínez, J., López Barrera, G. L., & González-Delgado, A. D. (2021b). Cultivation of *Chlorella* sp. for biodiesel production using two farming wastewaters in eastern Colombia. *Journal of Water and Land Development*, 50, 141-149. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138169>

Vacca-Jimeno, V. A., Angulo-Mercado, E. R., Puentes-Ballesteros, D. M., Torres-Yépez, J. G., & Plaza-Vega, M. E. (2017). Using the microalgae *Chlorella* sp. live suspended in decoloration wastewater from a textile factory. *Prospectiva*, 15(1), 93-99. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.829>

Vidal, D. R. A., Benítez, R. E. H., & Vanegas, J. (2018). Efecto de la inoculación de cianobacterias en cultivos de interés comercial en zonas semiáridas de La Guajira-Colombia. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 5(1), 20-31. <https://doi.org/10.23850/24220582.889>

Ye, Y., Liu, M., Yu, L., Sun, H., & Liu, J. (2024). *Nannochloropsis* as an Emerging Algal Chassis for Light-Driven Synthesis of Lipids and High-Value Products. *Marine Drugs*, 22(2), 54. <https://doi.org/10.3390/md22020054>

Wilczynski, L., Sarmiento, G., Colorado, M., Quimbaya, F., Téllez, A., & Mendoza, S. (2020, 25 de octubre). How to accelerate the production processes for the survival of human colonies (Conferencia). 18th IAA Symposium on Building Blocks for Future Space Exploration and Development. Dubai, United Arab Emirates. <https://iafastro.directory/iaac/paper/id/59107/summary/>